



**Ana Paula Godinho  
Cordeiro Mesquita**

**Modelos gaussianos de primeira e segunda geração:  
um caso de estudo**



**Ana Paula Godinho  
Cordeiro Mesquita**

**Modelos gaussianos de primeira e segunda geração:  
um caso de estudo**

dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Poluição Atmosférica, realizada sob a orientação científica da Doutora Ana Isabel Couto Neto da Silva Miranda, Professora Auxiliar do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro, e a co-orientação do Doutor António Pedro Viterbo de Sousa Azevedo, Investigador do Departamento de Investigação do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*

## **o júri**

presidente

Doutor Carlos Alberto Diogo Soares Borrego  
professor catedrático da Universidade de Aveiro

vogais

Doutor Nelson Augusto da Cruz Azevedo  
professor associado da Universidade Fernando Pessoa

Doutora Ana Isabel Couto Neto da Silva Miranda  
professora auxiliar da Universidade de Aveiro

Doutor António Pedro Viterbo de Sousa Azevedo  
Investigador do Departamento de Investigação do *European Centre for Medium-Range Weather  
Forecasts*

## agradecimentos

À TEJO ENERGIA – Produção e Distribuição de Energia Eléctrica, S.A. e à PEGOP – Energia Eléctrica, S.A., agradeço a disponibilização em tempo útil da informação cedida, nomeadamente de dados de emissões atmosféricas, meteorologia e qualidade do ar. Um agradecimento especial à Eng<sup>a</sup> Maria José Lopes, por todos os esclarecimentos prestados.

Ao Instituto Geográfico Português (Ministério das Cidades, Ordenamento do Território e Ambiente, Secretaria de Estado do Ordenamento do Território) ([www.igeo.pt](http://www.igeo.pt)) agradeço a cedência de informação geográfica oficial, no âmbito do Programa FIGIEE (Modelo Digital do Terreno do Continente, para a região do Pego, com uma malha de 25m) – Licença de Utilização nº 237/04.

Ao Instituto de Meteorologia (Ministério da Ciência e da Tecnologia) agradeço a cedência de informação meteorológica das estações climatológicas de Alvega, Tancos e Castelo Branco.

À EDP Produção EM – Engenharia & Manutenção, S.A., agradeço as facilidades dadas no decurso da elaboração da presente dissertação. Um agradecimento particular ao Engenheiro Nuno Portal.

Agradeço à Doutora Ana Isabel Miranda a orientação e o apoio prestados. Um reconhecimento especial pelo incentivo e pelo espírito positivo que me soube transmitir nos momentos mais cinzentos.

Ao Doutor António Pedro Viterbo agradeço também a orientação e todos os esclarecimentos na área da meteorologia.

Uma palavra de apreço ainda à família e aos amigos, em particular à Eng.<sup>a</sup> Luisa Nogueira, pelos ensinamentos sobre redes de qualidade do ar, e à Eng.<sup>a</sup> Clara Cristina Freitas e ao Eng.<sup>o</sup> Jorge Neto, sobre tratamento de dados meteorológicos.

Ao Miguel: muito obrigada. À Maria Ana e ao Domingos: “a mãe agora não pode” custou um bocadinho a ouvir... e muito a dizer. Agora a mãe já pode, e está feliz por isso.



## palavras-chave

AERMOD, ISCST3, modelo gaussiano de dispersão, qualidade do ar, dióxido de enxofre.

## resumo

O modelo gaussiano de dispersão atmosférica *Industrial Source Complex*, versão 3 (ISC3) tem sido amplamente usado em Portugal, nos últimos anos, em estudos de qualidade do ar. O ISC3 é, actualmente, o modelo de aplicação geral recomendado para aplicações regulamentares nos Estados Unidos da América, mas a curto prazo irá ser substituído pelo AERMOD, considerado um modelo de segunda geração que reflecte o conhecimento científico adquirido ao longo das últimas décadas. No âmbito da presente dissertação, os dois modelos são utilizados para previsão das concentrações de dióxido de enxofre ao nível do solo, resultantes das emissões de uma central termoelétrica convencional, a carvão, situada na região de Abrantes. É analisada a influência, nos valores estimados pelo AERMOD, da selecção de parâmetros relacionados com os usos do solo, específicos do local, que o modelo requer como dados de entrada. A apreciação geral do desempenho dos dois modelos, de primeira e segunda geração, para as condições de simulação que caracterizam o caso de estudo, tem por base a comparação entre as estimativas e as concentrações medidas nas estações de monitorização da qualidade do ar existentes na envolvente da central. O presente trabalho propõe um contributo adicional para a utilização, em Portugal, de modelos de dispersão de tipo gaussiano avançados, procurando identificar as vantagens, bem como as limitações presentes face à natureza e ao formato da informação de base requerida.

**keywords**

AERMOD, ISCST3, Gaussian dispersion model, air quality, sulphur dioxide.

**abstract**

The Gaussian dispersion model *Industrial Source Complex*, version 3 (ISC3) has been widely used in Portugal in air quality studies over the last years. ISC3 is currently the recommended model within the United States of America for general regulatory purposes, but soon will be replaced by AERMOD, which is considered a new generation model that incorporates the scientific knowledge gained over the last decades. Within the present dissertation, both models are applied to the prediction of sulphur dioxide ground level concentrations due to the emissions from a conventional coal power plant, located in Abrantes region. The sensitivity of AERMOD predictions to the selection of site-specific land use parameters, required as input, is discussed. The analysis of the overall performance of both old and new generation models, under the simulation conditions of the case study, is based on the comparison between predictions and measured concentrations from the air quality monitoring stations located around the plant site. The current work is intended to be a contribution to the use of advanced Gaussian type dispersion models in Portugal, trying to identify the advantages, as well as the current limitations considering the type and the format of the required base data.

## ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>MODELAÇÃO NUMÉRICA DE ESCALA LOCAL .....</b>	<b>3</b>
2.1	A EQUAÇÃO DO PENACHO GAUSSIANO.....	4
2.2	INFLUÊNCIA DA OROGRAFIA, DOS OBSTÁCULOS E DEPOSIÇÃO.....	7
2.3	LIMITAÇÕES E INCERTEZA .....	8
<b>3</b>	<b>OS MODELOS GAUSSIANOS DE DISPERSÃO DE PRIMEIRA E DE SEGUNDA GERAÇÃO – ISCST3 <i>VERSUS</i> AERMOD .....</b>	<b>11</b>
3.1	ISCST3 .....	11
3.2	AERMOD.....	13
3.3	PRINCIPAIS DIFERENÇAS ENTRE O ISCST3 E O AERMOD .....	14
3.3.1	<i>Dispersão do penacho</i> .....	14
3.3.2	<i>Efeitos de esteira</i> .....	16
3.3.3	<i>Parametrização da CLA</i> .....	16
3.3.4	<i>Orografia</i> .....	17
3.3.5	<i>Dados de entrada</i> .....	20
3.4	AValiação DOS MODELOS .....	23
<b>4</b>	<b>DESCRIÇÃO DO CASO DE ESTUDO .....</b>	<b>27</b>
4.1	CENTRAL TERMOELÉCTRICA DO PEGO .....	27
4.1.1	<i>Descarga e monitorização de efluentes gasosos</i> .....	30
4.1.2	<i>Regime de funcionamento e emissões atmosféricas de SO<sub>2</sub></i> .....	31
4.2	CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO DE ESTUDO .....	33
4.2.1	<i>Área de simulação</i> .....	33
4.2.2	<i>Orografia</i> .....	35
4.2.3	<i>Uso do solo</i> .....	38
4.2.4	<i>Meteorologia</i> .....	41
4.3	CARACTERIZAÇÃO DA QUALIDADE DO AR .....	50
4.4	QUALIDADE DO AR <i>VERSUS</i> EMISSÕES .....	68
<b>5</b>	<b>APLICAÇÃO DOS MODELOS .....</b>	<b>75</b>
5.1	CONDIÇÕES DE SIMULAÇÃO .....	75
5.1.1	<i>Fontes de emissão</i> .....	75
5.1.2	<i>Domínio de simulação e receptores</i> .....	76
5.1.3	<i>Opções de dispersão</i> .....	76
5.1.4	<i>Opções de meteorologia</i> .....	76

5.1.5	<i>Opções de saída dos modelos.....</i>	79
5.2	RESULTADOS OBTIDOS.....	79
5.2.1	<i>Influência dos parâmetros superficiais no AERMOD.....</i>	79
5.2.2	<i>Comparação das estimativas dos modelos na área de estudo .....</i>	88
6	<b>AVALIAÇÃO DOS MODELOS.....</b>	<b>97</b>
7	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>101</b>
8	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>105</b>
	<b>ANEXO A – ROSAS DE POLUIÇÃO .....</b>	<b>111</b>

## LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1 - Representação de um penacho Gaussiano de uma fonte pontual elevada.....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 2 – Fluxograma de informação no sistema de modelação AERMOD.....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 3 – ISCST3: representação do comportamento do penacho em terreno simples elevado.....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 4 – Relação entre o comprimento de Obukhov L e a rugosidade superficial <math>z_0</math> para várias classes de estabilidade de Pasquill-Gifford .....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 5 – Localização da Central Termoeléctrica do Pego (Base cartográfica: carta hipsométrica do Instituto Geográfico e Cadastral, de 1974, à escala 1:500.000).....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 6 – Implantação da Central Termoeléctrica do Pego (escala aproximada: 1:45000).....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 7 – Central Termoeléctrica do Pego: fluxograma geral .....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 8 – Domínio de simulação (27 x 31 km<sup>2</sup>). Coordenadas U.T.M. (metros) .....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 9- Orografia da região envolvente à Central do Pego e domínio de simulação (área delimitada a branco) .....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 10 - Orografia da região: domínio de aplicação do modelo AERMAP (altitude e coordenadas U.T.M. expressas em metros).....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 11 – Uso do solo na envolvente da Central Termoeléctrica do Pego. A circunferência laranja delimita uma área de cerca de 3 km de raio. ....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 12 – Central Termoeléctrica do Pego: fotografia aérea (escala aproximada: 1:17000).....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 13 – Procedimento de selecção dos parâmetros superficiais em função do uso do solo (exemplo: rugosidade).....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 14 – Comparação dos valores de nebulosidade (oitavos) estimados para a região de estudo e observados em Castelo Branco .....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 15 – Frequência do rumo do vento (%): comparação das séries de 2003 da Central do Pego e de Alvega com as normais 1961-1990 de Alvega.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 16 – Rosas de ventos anuais das estações da RMQA e da Central do Pego .....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 17 – Rosa de ventos anual e por estação do ano, relativas a 2003, para a estação meteorológica principal da Central do Pego (sensores instalados a 10 metros).....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 18 – Frequência anual de ocorrência das classes de estabilidade Pasquill-Gifford (%) .....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 19 – Frequência anual de ocorrência das classes de estabilidade de Pasquill-Gifford ao longo do dia .....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 20 – Frequência de classes de estabilidade de Pasquill-Turner em Alvega (1986-1987) – Média anual, de Inverno e de Verão .....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 21 – Emissão de SO<sub>2</sub> da Central do Pego (g.s<sup>-1</sup>) e concentrações de SO<sub>2</sub> (µg.m<sup>-3</sup>) no ambiente medidas na RMQA: valores médios mensais e anuais (2003).....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 22 – Valores médios (em cima) e mínimos (em baixo) mensais de SO<sub>2</sub> (µg.m<sup>-3</sup>) por estação da RMQA .....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 23 – Histogramas anuais das concentrações médias semi-horárias para as seis estações da RMQA: frequência (nº de médias semi-horárias) e frequência acumulada (%). ....</i>	<i>59</i>

<i>Figura 24 – Estação de Abrantes: evolução das concentrações médias semi-horárias de SO<sub>2</sub> (μg.m<sup>-3</sup>) em 2003</i> .....	60
<i>Figura 25 – Estação do Pego: evolução das concentrações médias semi-horárias de SO<sub>2</sub> (μg.m<sup>-3</sup>) em 2003</i> 61	
<i>Figura 26 – Estação de Mouriscas: evolução das concentrações médias semi-horárias de SO<sub>2</sub> (μg.m<sup>-3</sup>) em 2003</i> .....	61
<i>Figura 27 – Estação de Mação: evolução das concentrações médias semi-horárias de SO<sub>2</sub> (μg.m<sup>-3</sup>) em 2003</i> .....	62
<i>Figura 28 – Estação do Gavião: evolução das concentrações médias semi-horárias de SO<sub>2</sub> (μg.m<sup>-3</sup>) em 2003</i> .....	62
<i>Figura 29 – Estação de S. Facundo: evolução das concentrações médias semi-horárias de SO<sub>2</sub> (μg.m<sup>-3</sup>) em 2003</i> .....	63
<i>Figura 30 – Rosas anuais de poluição das concentrações médias horárias de SO<sub>2</sub></i> .....	64
<i>Figura 31 – Parâmetros estatísticos (μg.m<sup>-3</sup>) das séries de concentrações médias semi-horárias das estações da RMQA, para o ano 2003</i> .....	67
<i>Figura 32 – Relação entre os valores médios horários de concentração de SO<sub>2</sub> no ar ambiente (μg.m<sup>-3</sup>) e de emissão total da Central do Pego (g.s<sup>-1</sup>), em Abrantes e no Pego</i> .....	70
<i>Figura 33 – Relação entre os valores médios horários de concentração de SO<sub>2</sub> no ar ambiente (μg.m<sup>-3</sup>) e de emissão total da Central do Pego (g.s<sup>-1</sup>), nas Mouriscas e em Mação</i> .....	71
<i>Figura 34 – Relação entre os valores médios horários de concentração de SO<sub>2</sub> no ar ambiente (μg.m<sup>-3</sup>) e de emissão total da Central do Pego (g.s<sup>-1</sup>), no Gavião e em S. Facundo</i> .....	72
<i>Figura 35 – Valores máximos médios horários simulados pelo AERMOD para diferentes valores de rugosidade z<sub>0</sub>, razão de Bowen (β<sub>0</sub>) e albedo (r')</i> .....	83
<i>Figura 36 – Valores máximos médios diários simulados pelo AERMOD para diferentes valores de rugosidade z<sub>0</sub>, razão de Bowen (β<sub>0</sub>) e albedo (r')</i> .....	84
<i>Figura 37 – Uso do solo a Oeste da Central do Pego: série de fotografias obtidas no Castelo de Abrantes, do lado nascente (em cima) e Sul (em baixo)</i> .....	87
<i>Figura 38 – Concentração máxima média horária de SO<sub>2</sub> (μg.m<sup>-3</sup>) estimada pelo ISCST3</i> .....	91
<i>Figura 39 – Concentração máxima média horária de SO<sub>2</sub> (μg.m<sup>-3</sup>) estimada pelo AERMOD</i> .....	91
<i>Figura 40 – Segunda concentração média horária de SO<sub>2</sub> (μg.m<sup>-3</sup>) mais alta estimada pelo ISCST3 (esquerda) e pelo AERMOD (direita)</i> .....	92
<i>Figura 41 – 25ª concentração máxima média horária de SO<sub>2</sub> (μg.m<sup>-3</sup>), estimada pelo ISCST3 (esquerda) e pelo AERMOD (direita)</i> .....	93
<i>Figura 42 – Concentração máxima média diária de SO<sub>2</sub> (μg.m<sup>-3</sup>) estimada pelo ISCST3</i> .....	94
<i>Figura 43 – Concentração máxima média diária de SO<sub>2</sub> (μg.m<sup>-3</sup>) estimada pelo AERMOD</i> .....	94
<i>Figura 44 – Concentração média anual de SO<sub>2</sub> (μg.m<sup>-3</sup>) estimada pelo ISCST3</i> .....	95
<i>Figura 45 – Concentração média anual de SO<sub>2</sub> (μg.m<sup>-3</sup>) estimada pelo AERMOD</i> .....	95

*Figura 46 – Gráfico Q-Q das concentrações de SO<sub>2</sub> (µg.m<sup>-3</sup>) estimadas pelos modelos AERMOD e ISCST3 e observadas na RMQA.....* 97

## LISTA DE QUADROS

<i>Quadro 1 – Dados de produção e emissão específica de SO<sub>2</sub> da Central Termoelétrica do Pego, de 2000 a 2003.....</i>	<i>31</i>
<i>Quadro 2 – Características das fontes de emissão da Central do Pego.....</i>	<i>32</i>
<i>Quadro 3 – Valores médios de concentração de SO<sub>2</sub> nos efluentes gasosos (6% O<sub>2</sub>, gás seco) e massa total emitida anualmente, no período 2000-2003.....</i>	<i>32</i>
<i>Quadro 4 – Dados de emissão de SO<sub>2</sub> da Central do Pego, relativos a 2003 .....</i>	<i>33</i>
<i>Quadro 5 – Localização das estações da RMQA e dados fornecidos pelo AERMAP para os receptores correspondentes (m).....</i>	<i>37</i>
<i>Quadro 6 – Valores mínimos e máximos dos parâmetros albedo, razão de Bowen e rugosidade, calculados para a área envolvente da Central.....</i>	<i>41</i>
<i>Quadro 7 – Origem dos dados de nebulosidade.....</i>	<i>44</i>
<i>Quadro 8 – Estações de monitorização da RMQA da Central do Pego, orientação e distância à Central do Pego, altitude do local (z) e analisadores instalados.....</i>	<i>52</i>
<i>Quadro 9 – Características dos equipamentos da RMQA de medição de poluentes atmosféricos.....</i>	<i>52</i>
<i>Quadro 10 – Níveis de SO<sub>2</sub> registados nas estações de qualidade do ar nos anos de 1999-2003 e comparação com o Decreto-Lei 111/2002.....</i>	<i>53</i>
<i>Quadro 11 – Principais parâmetros estatísticos das séries horárias de concentrações de SO<sub>2</sub> medidas nas estações da RMQA, em 2003.....</i>	<i>53</i>
<i>Quadro 12 – Concentrações de SO<sub>2</sub> (µg.m<sup>-3</sup>) medidas nas estações da RMQA para diferentes taxas de emissão da Central do Pego.....</i>	<i>69</i>
<i>Quadro 13 – AERMOD: variação dos parâmetros superficiais r', z<sub>0</sub> e β.....</i>	<i>77</i>
<i>Quadro 14 – Valores dos parâmetros superficiais atribuídos na simulação 12 .....</i>	<i>78</i>
<i>Quadro 15 – Comparação dos resultados do AERMOD, obtidos por variação dos parâmetros superficiais, com os valores medidos nas estações da RMQA e simulados pelo ISCST3.....</i>	<i>81</i>
<i>Quadro 16 – Valores dos parâmetros superficiais correspondentes às simulações 10 a 12 e “Pego”, do Quadro 15. ....</i>	<i>82</i>
<i>Quadro 17 – Resultados da aplicação dos modelos AERMOD e ISCST3 .....</i>	<i>88</i>
<i>Quadro 18 – Número de ultrapassagens do valor limite horário, por receptor, estimado pelos modelos .....</i>	<i>89</i>
<i>Quadro 19 – Valores estimados pelo AERMOD e ISCST3 e valores medidos na RMQA .....</i>	<i>98</i>
<i>Quadro 20 – Comparação dos parâmetros estatísticos da série de observações e das séries simuladas pelo AERMOD (simulação C12) e pelo ISCST3 com e sem correcção .....</i>	<i>99</i>



## NOMENCLATURA

Símbolo	Unidades	Significado
$C$	$\text{g.m}^{-3}$	Concentração média de conjunto
$h$	m	Altura efectiva de emissão
$H_b$	m	Altura da estrutura próxima relativa à cota do solo na base da chaminé
$H_c$	m	Altura crítica de divisão do escoamento
$h_c$	m	Altura de escala do terreno
$H_g$	m	Altura de chaminé calculada com base em boas práticas de engenharia
$l$	m	Menor dimensão entre a altura e a largura projectada da estrutura próxima
$L$	m	Comprimento de Obukhov
$Q$	$\text{g.s}^{-1}$	Caudal mássico, constante, de emissão de poluente
$Q_H$	$\text{W.m}^{-2}$	Fluxo de calor sensível na superfície
$r'$	-	Albedo do meio-dia
$u$	$\text{m.s}^{-1}$	Velocidade do vento
$u^*$	$\text{m.s}^{-1}$	Velocidade de atrito, tangencial ou de corte
$u_s$	$\text{m.s}^{-1}$	Velocidade média do vento à altura do topo da chaminé
$w^*$	$\text{m.s}^{-1}$	Escala de velocidade convectiva
$x, y, z$	m	Coordenadas espaciais com origem na fonte pontual
$z_0$	m	Rugosidade superficial
$z_i$	m	Altura da camada de mistura
$\beta_o$	-	Razão de Bowen
$\theta$	K	Temperatura potencial

$\theta_*$	K	Escala de temperatura
$\sigma_v, \sigma_w$	$\text{m.s}^{-1}$	Desvios padrão das flutuações da velocidade do vento nas direcções $y$ e $z$ , respectivamente
$\sigma_y, \sigma_z$	m	Coeficientes de dispersão nas direcções $y$ e $z$ , respectivamente

## LISTA DE SIGLAS

Designação	Significado
AERMAP	AERMIC Terrain Preprocessor
AERMET	AERMIC Meteorological Preprocessor
AERMIC	AMS/EPA Regulatory Model Improvement Committee
AERMOD	AERMIC Model (AERMOD)
ASTM	American Society for Testing and Materials
CLA	Camada Limite Atmosférica
CLC	Camada Limite Convectiva
CLE	Camada Limite Estável
DEM	Digital Elevation Model
IM	Instituto de Meteorologia
ISC	Industrial Source Complex
ISCLT	Industrial Source Complex - Long Term
ISCST	Industrial Source Complex - Short Term
PRIME	Plume Rise Model Enhancements
REN	Rede Eléctrica Nacional
RHC	Robust Highest Concentration
RMQA	Rede de Monitorização da Qualidade do Ar
U.S. EPA	United States Environmental Protection Agency
TU	Tempo Universal



## 1 INTRODUÇÃO

Os modelos de dispersão de poluentes atmosféricos, de escala local, são ferramentas essenciais em estudos de qualidade do ar, seja no âmbito de avaliações de impacto ambiental ou de diagnósticos ambientais, na determinação de alturas de chaminés, na avaliação de técnicas de controlo e, mais recentemente, como uma componente importante dos planos de gestão integrada da qualidade do ar. Em Portugal têm sido utilizados de forma mais ou menos generalizada.

Na maioria das aplicações práticas, com fins regulamentares, são utilizados modelos de dispersão atmosférica de penacho Gaussiano. Outros tipos de modelos, como os modelos Lagrangeanos e Eulerianos, são usados em aplicações específicas de dispersão de poluentes, dado o seu grau de exigência ser maior, em termos de cálculo e de requisitos de informação de base.

Na última década, o modelo de dispersão *Industrial Source Complex* (ISC3) foi amplamente utilizado em Portugal, à semelhança de muitos outros países. Este modelo, desenvolvido pela Agência de Protecção Ambiental dos Estados Unidos (U.S. EPA), é o modelo de referência recomendado por esta agência em aplicações regulamentares. O ISC3 inclui dois modelos, o *Short Term* (ISCST3) e o *Long Term* (ISCLT3). O ISCST3 aceita dados meteorológicos horários e permite estimar concentrações médias no ar ambiente relativas a períodos de curta duração (médias horárias, diárias) e também períodos longos (médias anuais); o ISCLT3 simula a dispersão de poluentes numa base temporal de longa duração [U.S. EPA, 1995a].

Em termos de formulação, o ISC3 é considerado um modelo “desactualizado”, que não reflecte os conhecimentos actuais sobre dispersão e micrometeorologia [Cimorelli *et al.*, 2004; U.S. EPA, 2003a; Schulze, 2001].

Em 1991, a Sociedade Meteorológica Americana (AMS) e a EPA dos Estados Unidos constituíram um grupo de trabalho denominado **AERMIC** (**AMS/EPA REGULATORY Model Improvement Committee**), com o objectivo de desenvolver um modelo de dispersão para aplicações regulamentares, que reflectisse o “estado da arte” – particularmente no que diz respeito à parametrização da turbulência na Camada Limite Atmosférica (CLA), à interacção do penacho com o terreno, à libertação de poluentes atmosféricos ao nível do solo e à dispersão em zonas urbanas. É intenção da U.S. EPA que o modelo desenvolvido pelo AERMIC, o AERMOD, venha, a curto prazo, a substituir o ISC3 no mesmo tipo de aplicações [U.S. EPA, 2003b].

Embora existam disponíveis, na Europa, outros modelos com características idênticas ao AERMOD [Carruthers *et al.*, 1994; Borrego *et al.*, 1996], a sua utilização gratuita, facultada pela U.S. EPA, associada ao facto do modelo ter sido amplamente testado em condições de modelação diversas (tipos de fontes, de terreno, etc.), de se encontrar muito bem documentado, estando os manuais do modelo e informação complementar relevante facilmente acessíveis no endereço de Internet da U.S. EPA (URL 1) e, finalmente, o facto desta agência assegurar uma

atualização permanente do *software*, são argumentos de peso a favor da adopção futura do AERMOD em Portugal, em substituição do ISCST3.

O objectivo desta dissertação consistiu numa análise comparativa da aplicação do ISCST3 e do AERMOD a um caso de estudo, caracterizado por uma emissão em altura de uma fonte pontual com penacho flutuante, orografia complexa e camada limite rural. A fonte de emissão em causa é a Central Termoeléctrica do Pego, situada no concelho de Abrantes (distrito de Santarém), tendo o estudo sido centrado nas emissões de dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ) – poluente considerado como não reactivo à escala em análise – e num ano de dados de referência (2003). Os resultados, obtidos por aplicação dos dois modelos, foram comparados entre si e avaliados tendo por base os dados registados na rede de monitorização da qualidade do ar, existente na envolvente da Central.

Os conceitos fundamentais sobre modelação numérica de dispersão de poluentes à escala local, nomeadamente os modelos de formulação Gaussiana, são revistos no capítulo seguinte.

A análise comparativa das características e potencialidades dos dois modelos de dispersão, efectuada no capítulo 3, permite aprofundar alguns dos conceitos do capítulo anterior. Tratando-se de modelos desenvolvidos nos Estados Unidos, os seus códigos de programação e interfaces de utilização foram concebidos à medida do tipo e do formato da informação existente naquele país, nomeadamente no que diz respeito à informação de meteorologia e de altimetria do terreno. A sua aplicação em Portugal, como noutros países da Europa, levanta alguns problemas e apresenta limitações, exigindo um pré-tratamento adicional da informação de base, uma vez que nem todos os dados de entrada estão disponíveis ou se apresentam no formato exigido pelos modelos. Estes aspectos são também analisados no capítulo 3.

No capítulo 4 é descrito o caso de estudo. No capítulo 5 resumem-se os pressupostos de base da aplicação dos modelos e as condições de simulação; neste capítulo apresentam-se, ainda, os resultados obtidos no domínio de estudo e, em particular, para seis receptores discretos, cujas localizações são coincidentes com as das estações da RMQA. Para estes receptores, apresenta-se uma análise de sensibilidade do AERMOD à variação dos parâmetros de entrada relacionados com as características superficiais do terreno.

A avaliação do desempenho do AERMOD e do ISCST3, na aplicação ao caso de estudo, foi feita por comparação com a informação disponível da rede de qualidade do ar. Os resultados dessa avaliação apresentam-se no capítulo 6.

Finalmente, no capítulo 7 são apresentadas as principais conclusões e limitações do estudo, sendo feitas algumas sugestões de desenvolvimentos futuros, que dêem continuidade ao trabalho realizado.

## 2 MODELAÇÃO NUMÉRICA DE ESCALA LOCAL

Os modelos de dispersão atmosférica são expressões matemáticas que descrevem a distribuição espacial e temporal dos poluentes emitidos na atmosfera, ou seja, os efeitos da atmosfera sobre esses mesmos poluentes, permitindo estimar grandezas – concentração ou deposição – que traduzem a qualidade do ar.

São ferramentas indispensáveis em estudos de avaliação de qualidade do ar, permitindo estimar concentrações quando não existam dados de medições disponíveis ou, quando existam, complementando essa informação, uma vez que as medições são feitas num número limitado de locais, não sendo representativas de áreas extensas.

Na maior parte dos países europeus, os modelos são usados para fins regulamentares: obtenção de licenças (normalmente fontes pontuais) ou estudos de impacto ambiental (como instalações industriais [Borrego *et al.*, 1995] ou auto-estradas [Miranda *et al.*, 1993; Borrego *et al.*, 2000a; Borrego *et al.*, 2001; Borrego *et al.*, 2002]), fornecendo uma distribuição espacial de concentrações altas episódicas e de concentrações médias de longo prazo, para comparação com os valores limite de qualidade do ar.

Os modelos de poluição atmosférica podem constituir instrumentos de apoio importantes na gestão da qualidade do ar a nível local [Borrego *et al.*, 2002; Borrego *et al.*, 2003a], na medida em que fornecem indicações úteis na optimização das estratégias de controlo de poluição atmosférica, através da análise de cenários de emissão e da previsão do efeito de medidas de redução.

Os modelos que descrevem a dispersão e o transporte de poluentes na atmosfera podem ser classificados de diversas formas [Nixon *et al.*, 1999], nomeadamente em termos de:

- Escala espacial (global, regional-continental, local-regional e local);
- Escala temporal (modelos episódicos, modelos de longo termo),
- Tratamento das equações de transporte (Eulerianos, Lagrangianos);
- Tratamento de vários processos (químicos, deposição seca e húmida);
- Complexidade da aproximação.

Em condições ideais, a concentração de um poluente emitido por uma fonte pontual tem uma distribuição Gaussiana. Apesar de isto ser estritamente verdade apenas no caso de turbulência homogénea e estacionária, está na base de uma extensa classe de fórmulas de dispersão atmosférica comumente usadas. Estas fórmulas baseiam-se na expressão para a concentração média de um poluente emitido continuamente por uma fonte pontual elevada, a chamada equação do penacho Gaussiano [Seinfeld e Pandis, 1998]. Os modelos de penacho Gaussiano são largamente usados [Miranda *et al.*, 1993; Borrego *et al.*, 1995; Leong *et al.*, 2000; Borrego *et al.*, 2001]. A maioria dos modelos recomendados pela U.S. EPA é do tipo Gaussiano.

Os fenómenos de poluição atmosférica são influenciados marcadamente pelos processos atmosféricos, geralmente classificados quanto à escala espacial dos movimentos atmosféricos [Seinfeld e Pandis, 1998]: microescala (0 a 100 metros), mesoscala (dezenas a centenas de quilómetros), escala sinóptica (centenas a milhares de quilómetros) e escala planetária (para fenómenos que ocorrem a escalas que excedem 5.000 km). A chamada escala local ou urbana é característica de fenómenos, como a poluição atmosférica urbana, que ocorrem numa escala espacial entre cerca de 100 metros e poucas dezenas de quilómetros, intermédia entre a microescala e escala regional ou mesoscala. Os modelos Gaussianos são modelos de escala local, que não devem ser aplicados a distâncias superiores a 10-20 km da fonte [American Meteorological Society, 1978]. Para distâncias maiores, o pressuposto de estado estacionário, inerente a este tipo de modelos, não é aceitável, devendo ser usados modelos de transporte de longa distância.

## **2.1 A equação do penacho Gaussiano**

A dispersão de gases e partículas, num escoamento turbulento, pode ser descrita de duas formas básicas: a aproximação Euleriana, na qual o comportamento do poluente é analisado em relação a um sistema fixo de coordenadas – a forma mais comum de tratar os fenómenos de transferência de calor e massa –, e a aproximação Lagrangiana, na qual as variações de concentração são descritas em relação ao fluido em movimento.

Ambas são descrições válidas da dispersão turbulenta e conduzem a diferentes tipos de expressões matemáticas da concentração dos poluentes (que podem ser relacionadas).

Os métodos Eulerianos descrevem estatisticamente a concentração em termos de propriedades estatísticas das velocidades do fluido Euleriano, isto é, velocidades medidas em pontos fixos do fluido. Este tipo de formulação é muito útil, porque os parâmetros estatísticos Eulerianos são directamente mensuráveis (através da medição contínua da velocidade do vento numa rede fixa de anemómetros). O inconveniente desta aproximação é, até ao momento, a impossibilidade matemática de obtenção de uma solução válida para o problema do fecho da turbulência, devido ao facto de o número de variáveis dependentes ser superior ao número de equações.

As técnicas Lagrangianas descrevem estatisticamente a concentração, em termos de propriedades estatísticas de grupos de partículas lançadas no fluido. Apesar de não existir, neste caso, o problema do fecho das equações, a aplicabilidade da equação resultante é limitada, pela dificuldade em determinar com exactidão essas propriedades.

Nenhuma das duas aproximações fornece uma solução exacta para a concentração média de uma espécie num fluido turbulento; para obter descrições práticas da dispersão atmosférica, é necessário recorrer a aproximações e pressupostos de base [Seinfeld e Pandis, 1998].

Partindo da descrição Euleriana dos fenómenos de dispersão turbulenta, a concentração de uma espécie poluente num fluido deve satisfazer, em cada instante, um balanço de massa sobre o



elemento de volume do fluido, que é traduzido pela equação diferencial de transporte/dispersão (equação de conservação da massa de poluente). Esta equação, na ausência de reacção química, toma a forma:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + V_x \frac{\partial C}{\partial x} + V_y \frac{\partial C}{\partial y} + V_z \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial C}{\partial z} \right)$$

sendo:

$V_x, V_y$  e  $V_z$  - componentes médias do vector velocidade das partículas do poluente (normalmente confundidas com as componentes da velocidade do vento);

$K_x, K_y$  e  $K_z$  - difusividades turbulentas.

Assumindo que as difusividades são constantes, a solução da equação de dispersão atmosférica tem uma forma Gaussiana [Seinfeld e Pandis, 1998].

Para uma fonte de emissão contínua, com caudal de poluente  $Q$ , em termos de massa por unidade de tempo, supondo que a dispersão tem lugar nas direcções  $y$  e  $z$  e que apenas existe convecção segundo  $x$  (suposição de penacho longo e delgado), sendo a dispersão desprezável na direcção do vento quando comparada com a componente do transporte, a concentração média é dada pelas seguintes expressões, para os pressupostos seguintes:

1. Reflexão total do penacho quando atinge o solo (isto é, não há deposição nem reacção química com o terreno):

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u_s \sigma_y \sigma_z} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{y}{\sigma_y} \right)^2 \right] \left[ \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{z-h}{\sigma_z} \right)^2 \right] + \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{z+h}{\sigma_z} \right)^2 \right] \right]$$

sendo:

$C$  – Concentração média de conjunto teórica à distância  $x$  a jusante da fonte e à distância  $y$  na direcção perpendicular à direcção do vento;

$Q$  – Caudal mássico, constante, de emissão de poluente;

$h$  – Altura efectiva de emissão (correspondente à soma da altura da chaminé,  $h_s$ , e da sobre-elevação do penacho,  $\Delta h$ );

$\sigma_y$  e  $\sigma_z$  - Coeficientes de dispersão, respectivamente na direcção horizontal perpendicular à do vento (lateral), e na direcção vertical;

$u_s$  – Velocidade média do vento (constante) ao nível do topo da chaminé, na direcção  $x$ ;

$x, y, z$  - Coordenadas espaciais com origem na fonte pontual.

2. Absorção total do penacho no solo ( $z=0$ ):

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u_s \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \left[ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-h}{\sigma_z}\right)^2\right] - \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+h}{\sigma_z}\right)^2\right] \right]$$

3. É, ainda, possível derivar uma terceira fórmula de penacho Gaussiano, para o caso de uma fonte contínua localizada à altura efectiva de emissão  $h$ , entre limites impermeáveis, não absorventes, separados por uma distância  $z_i$  [Seinfeld e Pandis, 1998]; este caso representa, fisicamente, a existência de uma camada de inversão à altura  $z_i$ , que restringe o crescimento vertical do penacho.

A equação gaussiana tem várias aplicações a casos especiais, que ocorrem frequentemente, por exemplo:

- No cálculo da concentração ao nível do solo ( $z=0$ ) – largamente usada, para conhecer as concentrações a que os seres vivos estão expostos,
- No cálculo da concentração máxima ao nível do solo para uma distância  $x$  determinada, que ocorre no eixo do penacho ( $y=0$ ), dada por:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{\pi \sigma_y \sigma_z u_s} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{h}{\sigma_z}\right)^2\right]$$

A concentração  $C$ , nas equações anteriores, é uma concentração média calculada para o mesmo intervalo de tempo que os coeficientes de dispersão do penacho,  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$ . Os coeficientes de dispersão são funções do tempo de deslocamento e, portanto, da distância percorrida na direcção do vento, isto é, na direcção  $x$ ; dependem da estabilidade atmosférica e do tempo para o cálculo das médias, sendo determinados experimentalmente.

As equações anteriores são válidas em condições ideais, frequentemente não aplicáveis nas condições ambientais reais. Ainda assim, a equação de penacho Gaussiano tem sido largamente utilizada, devido ao facto de os parâmetros de dispersão  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$  poderem ser derivados de concentrações medidas em ensaios reais de dispersão atmosférica, em condições próximas das de aplicação [Seinfeld e Pandis, 1998].

Os coeficientes de dispersão,  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$ , podem ser obtidos através de correlações com base:

- Na teoria da semelhança:

$$\sigma_y = \sigma_v t F_y$$

$$\sigma_z = \sigma_w t F_z,$$

em que  $\sigma_v$  e  $\sigma_w$  são os desvios padrão das flutuações da velocidade do vento nas direcções  $y$  e  $z$ , respectivamente, e  $F_y$  e  $F_z$  são funções universais de um conjunto de parâmetros que especificam as características da CLA.  $F_y$  e  $F_z$  dependem da velocidade de atrito  $u_*$ , do comprimento de Obukhov  $L$ , do parâmetro de Coriolis  $f$ , da altura da camada de mistura  $z_i$ , da escala de velocidade convectiva  $w_*$ , da rugosidade superficial  $z_0$  e da altura efectiva de emissão,  $h$ . As variâncias  $\sigma_y^2$  e  $\sigma_z^2$  são, desta forma, tratadas como coeficientes de dispersão empíricos, cujas formas funcionais são determinadas por confronto da solução Gaussiana com dados experimentais, compensando, desta forma, os desvios das condições estacionárias e homogêneas inerentes à distribuição Gaussiana que se assumiu [Seinfeld e Pandis, 1998].

- Nas classes de estabilidade de Pasquill: correlações baseadas nas chamadas curvas de Pasquill-Gifford, muito úteis quando não se conhecem as variáveis atmosféricas em que se baseiam as correlações anteriores. Para uso em equações de dispersão, é conveniente ter expressões analíticas dos coeficientes de dispersão em função de  $x$ ; muitas das formas determinadas empiricamente podem ser representadas pelas expressões seguintes:

$$\sigma_y = a x^p$$
$$\sigma_z = b x^q.$$

Encontram-se disponíveis, na literatura, valores de  $a$ ,  $b$ ,  $p$  e  $q$  tabelados para as diferentes classes de estabilidade de Pasquill-Gifford e diferentes médias temporais [Seinfeld e Pandis, 1998].

## 2.2 Influência da orografia, dos obstáculos e deposição

O relevo do terreno é um aspecto importante na modelação da dispersão de poluentes atmosféricos, porque as concentrações no ambiente, bem como as taxas de deposição, são influenciadas pela altura do penacho acima do nível do solo, em cada local.

A orografia é caracterizada, para efeitos de modelação, como a elevação do terreno relativamente à cota do topo da chaminé; é considerada complexa, se as cotas do terreno da região em que se insere a chaminé – o domínio de simulação, que poderá estender-se até 10-20 quilómetros da fonte – excederem a cota do topo da chaminé, e simples, no caso de serem inferiores ou iguais.

As dificuldades de simulação, em condições de terreno de orografia complexa, prendem-se com a possibilidade de ocorrência de condições de estagnação durante períodos longos, no interior de vales, e com a identificação das condições em que o penacho poderá embater no terreno, originando concentrações altas ao nível do solo [Schnelle e Dey, 2000]. Alguns modelos Gaussianos procuram simular o comportamento do penacho em terreno complexo.

Também os efeitos de esteira dos edifícios têm um impacto importante nas concentrações e taxas de deposição junto às chaminés; estes efeitos traduzem-se em linhas de corrente que forçam o penacho a dirigir-se para o solo antes do que aconteceria se o edifício não existisse. Muitos modelos Gaussianos incluem algoritmos que têm em consideração este fenómeno; alguns modelos recorrem a técnicas expeditas, que proporcionam resultados conservativos, outros modelos incluem algoritmos de cálculo mais desenvolvidos, proporcionando estimativas mais refinadas.

A U.S. EPA recomenda que os impactes, na qualidade do ar, associados a este tipo de efeitos, sejam determinados quando a altura da chaminé que se pretende modelar não satisfizer a altura determinada com base em *Boas Práticas de Engenharia* (*Good Engineering Practice* - GEP) [U.S. EPA, 1985], calculada a partir da fórmula seguinte:

$$H_g = H_b + 1,5l$$

sendo:

$H_g$  – altura de chaminé que traduz as boas práticas de engenharia,

$H_b$  – altura da(s) estrutura(s) próxima(s) medida a partir da cota do solo na base da chaminé,

$l$  – menor dimensão entre a altura e a largura projectada da(s) estrutura(s) próxima(s).

A altura e a largura da estrutura referidas são determinadas considerando a área frontal da estrutura, projectada no plano perpendicular à direcção do vento.

Os efeitos da sedimentação gravítica e da deposição seca nas concentrações podem ser desprezados para poluentes gasosos e partículas pequenas (de diâmetro inferior a  $0,1 \mu\text{m}$ ). Para os outros casos, existem modelos Gaussianos com algoritmos incorporados para cálculo da deposição seca e húmida de partículas.

## 2.3 Limitações e incerteza

Sendo indispensáveis em estudos de qualidade do ar, os modelos atmosféricos apresentam limitações importantes. A maioria dos modelos tem implícita uma média temporal e espacial, que impede uma comparação directa das estimativas com valores medidos num dado local e num momento determinado. Para além disso, a incerteza associada aos resultados é variável consoante o modelo usado, o tipo de aplicação e as características específicas do local; pode ser introduzida pelo próprio modelo, pelos dados de entrada (dados de emissão, meteorologia), ou estar associada à variabilidade natural devida à turbulência atmosférica.

A incerteza dos modelos Gaussianos pode ser classificada em três categorias [Sax et al., 2003]: incerteza associada aos dados de entrada, incerteza associada aos parâmetros e incerteza conceptual. A incerteza introduzida com os dados de entrada provém de erros de medição, erros

de estimativa e variabilidade inerente. A incerteza dos parâmetros do modelo está presente porque um só valor de um parâmetro não pode caracterizar completamente um domínio de simulação. A incerteza conceptual ocorre porque o código de programação simples, usado para estimar a dispersão, não pode caracterizar por completo os processos físicos e a variabilidade natural inerente a estes processos.

A precisão de um modelo Gaussiano clássico de dispersão é resumida em seguida [American Meteorological Society, 1978]:

- Para as fórmulas que empregam valores dos desvios padrão calculados com base nas classes de estabilidade, aplicadas para estimar concentrações em circunstâncias ideais onde exista terreno uniforme e parâmetros meteorológicos estáveis, o valor máximo observado de concentração ao nível do solo, a jusante da fonte, estará dentro do intervalo de  $\pm 10\text{-}20\%$  da concentração calculada para uma fonte ao nível do solo e  $\pm 20\text{-}40\%$  para uma fonte elevada.
- Na maior parte das aplicações reais, para as quais os parâmetros meteorológicos são medidos a partir de um mastro meteorológico, as condições são razoavelmente estáveis e horizontalmente homogéneas (menos de 50% de variação da média espacial e temporal durante o ensaio) e, desde que não existam “circunstâncias excepcionais” que possam afectar a capacidade dispersiva de um modo não contemplado no modelo, poder-se-á esperar uma precisão dada por um factor de 2.

A avaliação de um modelo deve ser enquadrada num sistema, mais amplo, de garantia de qualidade do modelo (*Model Quality Assurance*). Este sistema integra actividades de gestão que envolvem o planeamento – definição de objectivos/ âmbito e selecção de indicadores de qualidade do modelo –, a documentação – descrição do modelo e das bases de dados –, e a verificação – científica e orientada para o utilizador [Borrego *et al.*, 2000b].

Os objectivos de qualidade baseiam-se em indicadores de qualidade, que são normalmente parâmetros estatísticos, podendo também ser características qualitativas, como a representatividade, por exemplo.

A avaliação dos modelos engloba um conjunto de procedimentos destinados a medir o seu desempenho. Os procedimentos seguintes devem ser considerados na sua avaliação [Borrego *et al.*, 2003b]:

- Verificação, procurando demonstrar que o modelo técnico representa, de forma apropriada, o modelo teórico no qual está baseado e que as equações matemáticas foram resolvidas de forma correcta;
- Validação – por comparação com dados experimentais –, procurando demonstrar que o modelo conceptual e o código de programação representam o problema de forma adequada;

- Análise de sensibilidade, através da qual é identificada a magnitude, direcção e forma (linear ou não linear) do efeito de um parâmetro individual nos resultados do modelo;
- Análise de incerteza, que visa caracterizar as incertezas associadas aos resultados. Pode ser qualitativa (define a origem e a magnitude do erro), semi-quantitativa (taxa, indicadores relativos) ou quantitativa (parâmetros estatísticos, método de probabilidade, propagação de erros).
- Inter-comparação de modelos, processo de avaliação do desempenho de um modelo por comparação simultânea dos resultados de diferentes modelos aplicados à mesma situação.

A nível europeu, no âmbito de uma série de conferências intituladas “*Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes*” (URL 2), procura-se promover o desenvolvimento de metodologias melhoradas para a caracterização do desempenho de modelos de dispersão atmosférica. Presentemente existem pelo menos dois tipos de “ferramentas” de avaliação de modelos de dispersão atmosférica bem documentadas [Olesen, 2001]:

- O *Model Validation Kit*: inclui 4 séries de dados e ferramentas de análise estatística e gráfica; tem como limitações o facto de considerar apenas o caso clássico da chaminé simples e de não ter em consideração a natureza estocástica da dispersão atmosférica;
- A norma ASTM *Standard Guide for Statistical Evaluation of Atmospheric Dispersion Model Performance* (D 6589) [ASTM, 2000], que aborda o enquadramento e os procedimentos para a avaliação de modelos. Este enquadramento é genérico (não limitado ao caso da chaminé única) e pretende ter em conta a natureza estocástica das observações de uma forma consistente.

A avaliação de um modelo passa, assim, por comparar as suas estimativas com medidas fiáveis, sendo os desvios identificados analisados estatisticamente para permitir quantificar as incertezas do modelo. Não obstante a simplicidade do método, as dificuldades na interpretação dos resultados são consideráveis, uma vez que os desvios verificados entre as observações e as estimativas podem ser devidos a vários factores: deficiências relacionadas com os pressupostos e parametrizações do modelo, erros de medição relacionados com os dados de entrada (em particular dados de emissões e dados meteorológicos), incerteza “inerente” relacionada com a natureza estocástica dos processos atmosféricos, erros de medição nas observações, incertezas na representatividade das séries de dados observados e modelados, etc. [Nixon *et al.*, 1999].

### 3 OS MODELOS GAUSSIANOS DE DISPERSÃO DE PRIMEIRA E DE SEGUNDA GERAÇÃO – ISCST3 *VERSUS* AERMOD

As principais características, os pressupostos de base e as limitações dos modelos Gaussianos de dispersão foram abordados no capítulo anterior, numa perspectiva geral. Descrevem-se, seguidamente, os dois modelos objecto do caso de estudo: o ISCST3 e o AERMOD.

O ISCST3 [U.S. EPA, 1995a] e o AERMOD [Cimorelli *et al.*, 2004] são ambos modelos Gaussianos de estado estacionário, aplicáveis a emissões e condições meteorológicas constantes em cada intervalo de simulação (tipicamente uma hora). Destinam-se a estimar as concentrações no ar ambiente de poluentes primários considerados não reactivos à escala do problema em estudo.

No âmbito desta dissertação foram usadas a versão 02035 do ISCST3 e a versão 02222 do AERMOD.

#### 3.1 ISCST3

O modelo ISCST3 é baseado na equação de penacho rectilíneo Gaussiano, de estado estacionário, com algumas modificações introduzidas no sentido de lhe permitir simular as emissões de diferentes tipos de fontes, efeitos de esteira de edifícios, etc.

Assim, o ISCST3 pode ser aplicado a uma grande variedade de fontes associadas a complexos industriais, modeladas como fontes pontuais, em área, em linha ou em volume, dependendo das suas características. O modelo pode comportar cálculos de:

- Deposição seca e húmida de partículas;
- Efeitos de esteira dos edifícios;
- Sobre-elevação do penacho dependente da distância a jusante da fonte;
- Aplicação a terreno simples ou, como método expedito, a terreno complexo.

O ISCST3 usa dados meteorológicos horários para definir as condições de ascensão, transporte, dispersão e deposição do penacho. Para cada hora de dados meteorológicos fornecidos pelo utilizador, o modelo estima valores de concentração (ou deposição) para cada par fonte/receptor. Calcula médias de curta duração ou de longa duração. O número e a localização dos receptores são especificados pelo utilizador, correspondendo aos nós da(s) malha(s) polar(es) ou Cartesiana(s) por ele definida(s).

Para cada fonte, a origem do sistema de coordenadas é colocada ao nível do solo na base da chaminé; o eixo do  $x$  é positivo na direcção do vento, o eixo do  $y$  é transversal ao eixo do  $x$  e o eixo do  $z$  estende-se na vertical (Figura 1).

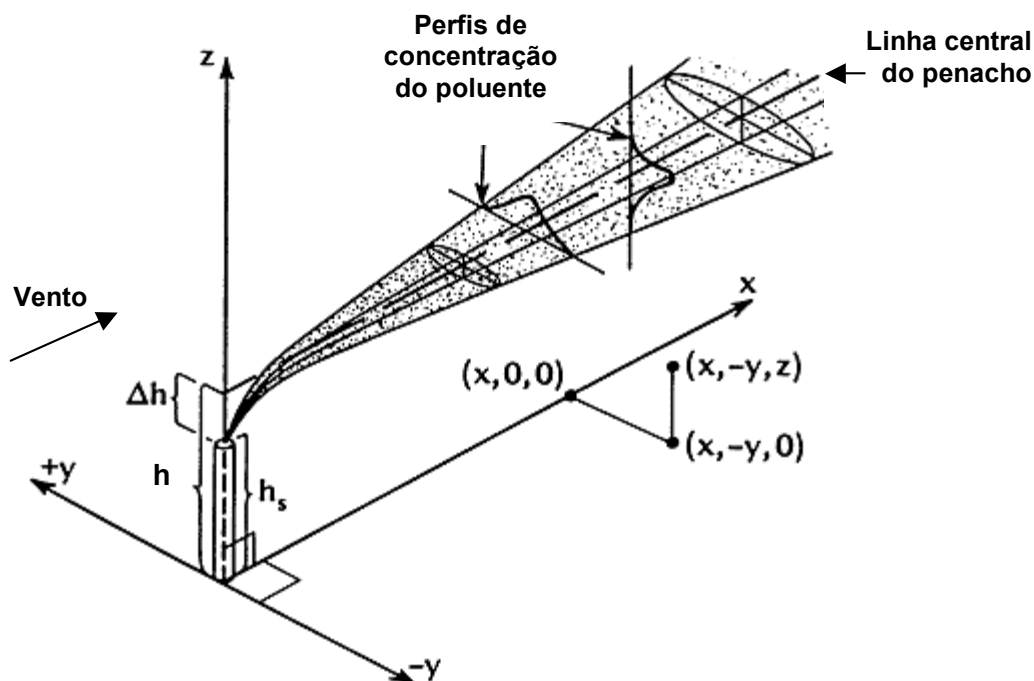


Figura 1 - Representação de um penacho Gaussiano de uma fonte pontual elevada

Para calcular o campo de concentrações devido à emissão de um dado poluente por uma fonte pontual contínua, é necessário conhecer o caudal mássico de poluente emitido, a velocidade do vento ao nível da cota do topo da chaminé  $u_s$ , a altura efectiva da fonte  $h$ , os coeficientes de dispersão  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$  e a altura da camada de mistura  $z_i$  – usados directamente na equação do penacho Gaussiano (capítulo 2.1).

O caudal mássico de emissão, a altura da camada de mistura rural e urbana e a velocidade do vento, obtida a uma dada altura de referência, são dados de entrada fornecidos directamente ao modelo pelo utilizador. O ISCST3 ajusta as medidas de velocidade do vento à altura do topo da chaminé, recorrendo, para tal, à lei do perfil da potência; os expoentes do perfil de velocidade do vento tomam valores diferentes consoante o tipo de superfície - rural ou urbana - e de estabilidade atmosférica (em termos de classes de Pasquill-Gifford). Ainda relativamente à velocidade do vento, a componente horizontal é assumida como sendo constante em cada intervalo horário (estado estacionário). A componente vertical da velocidade do vento é considerada nula.

A altura efectiva de emissão e os coeficientes de dispersão são determinados pelo modelo.

Os algoritmos usados pelo modelo encontram-se descritos no Volume II do Manual do utilizador do ISC3 [U.S. EPA, 1995a].



## 3.2 AERMOD

O AERMOD foi desenvolvido com o objectivo de substituir o ISCST3, recorrendo a técnicas de simulação recentes, ou novas. No entanto, foi mantida a arquitectura computacional de interface do ISCST3 e foram mantidas, ou melhoradas, as potencialidades actuais daquele modelo [Schulze, 2001].

O AERMOD é um sistema de modelação constituído por dois pré-processadores e um modelo de dispersão. A informação meteorológica necessária para caracterizar a CLA é fornecida pelo pré-processador meteorológico AERMET (*AERMIC meteorological preprocessor*) [Paumier e Brode, 1999]; por seu lado, o pré-processador AERMAP (*AERMIC terrain preprocessor*) [Eckhoff, 2003] caracteriza o terreno e gera malhas de receptores para o modelo de dispersão AERMOD. A Figura 2 (adaptada de Cimorelli *et al.* (2004)) mostra o fluxo de informação e a forma como esta informação é processada no AERMOD.

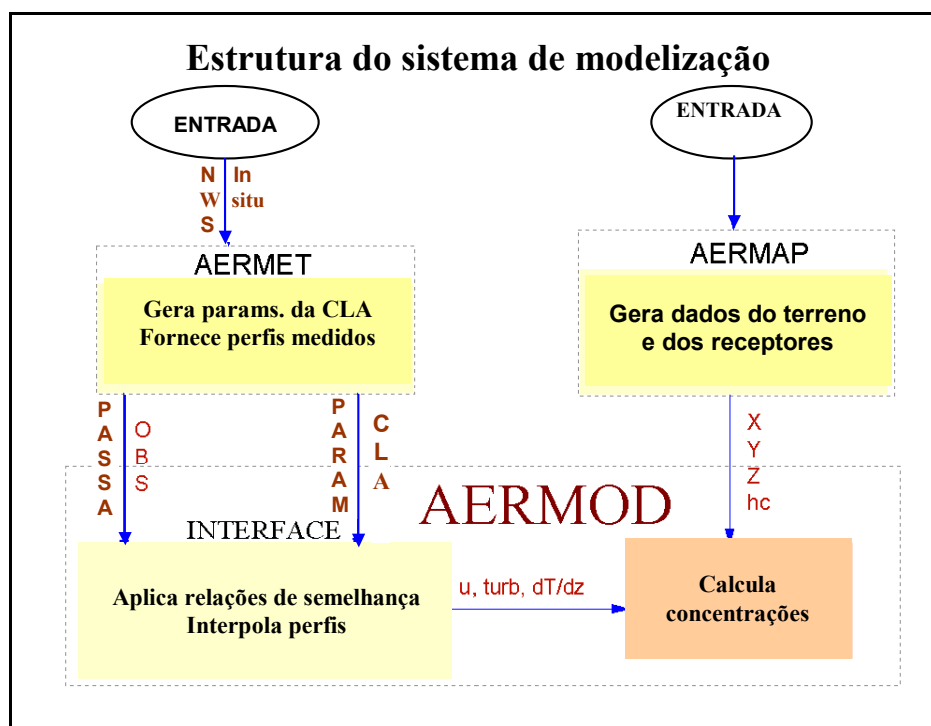


Figura 2 – Fluxograma de informação no sistema de modelação AERMOD

O AERMET requer, como dados de entrada, informação meteorológica horária e valores de parâmetros característicos do uso do solo. Com base nestes dados, o pré-processador AERMET calcula vários parâmetros da CLA os quais, conjuntamente com valores medidos, são usados pela chamada "INTERFACE" (que faz parte do AERMOD) no cálculo de perfis verticais de vento, turbulência e temperatura.

O AERMAP necessita de dados de terreno que obtém de um ficheiro de entrada, fornecido pelo utilizador, contendo um modelo digital do terreno da região em causa, com um formato específico, de tipo *Digital Elevation Model* (DEM).

O AERMAP gera malhas de receptores, sendo a altura de cada receptor calculada a partir da informação do ficheiro DEM de entrada. Para estas malhas, o AERMAP calcula, para cada ponto receptor, uma altura representativa da influência do terreno, designada por escala de altura do terreno ( $h_c$ ), que representa o terreno dominante para as linhas de corrente na proximidade do receptor; pode ser entendida como a altura do terreno na vizinhança do receptor que mais influenciará o escoamento em condições estáveis.

O AERMAP fornece a seguinte informação ao AERMOD, para cada receptor: localização, altitude e escala de altura  $h_c$ .

### 3.3 Principais diferenças entre o ISCST3 e o AERMOD

Uma análise das principais características que diferenciam os dois modelos consta de dois documentos de avaliação do AERMOD publicados pela U.S. EPA [Paine *et al.*, 1998; U.S. EPA, 2003a].

Salientam-se as principais diferenças existentes entre os dois modelos de dispersão. A descrição irá centrar-se, essencialmente, nas características do caso de estudo, isto é, nas equações dos modelos para emissões de fontes pontuais e no tratamento físico considerado em função do tipo de terreno (simples ou complexo).

#### 3.3.1 Dispersão do penacho

O ISCST3 é um modelo de dispersão do tipo Gaussiano, baseado, como tal, na equação fundamental da dispersão turbulenta, supondo regime estacionário, vento uniforme e de direcção constante, dispersão desprezável na direcção do vento quando comparada com a componente do transporte, e distribuição Gaussiana das concentrações, nos planos horizontal e vertical do penacho.

O tratamento da dispersão no AERMOD é semelhante ao do ISCST3 – baseado na equação Gaussiana – quer no plano horizontal, quer, em condições de estabilidade, também no plano vertical. Em condições de instabilidade, no entanto, a dispersão vertical é tratada de forma diferente, mais próxima das condições reais, sendo descrita por uma função de densidade de probabilidade não Gaussiana.

O ISCST3 calcula a altura do penacho, ou a altura efectiva de emissão, por aplicação das fórmulas de Briggs, com base no gradiente vertical de temperatura e na velocidade do vento ao nível do topo da chaminé. Em condições de estabilidade, o AERMOD usa também as fórmulas de Briggs, tendo por base os valores das mesmas variáveis à altura da chaminé e, também, a um

nível intermédio entre o topo da chaminé e a altura final do penacho; ou seja, ao contrário do ISCST3, o AERMOD tem em conta a variação destes parâmetros acima do topo da chaminé. Em condições de instabilidade, o AERMOD considera as correntes convectivas ascendentes e descendentes, combinando a elevação do penacho com os deslocamentos originados pelas velocidades convectivas aleatórias.

A expansão do penacho é outro aspecto em que os dois modelos apresentam diferenças. No ISCST3, esta expansão é obtida através de uma formulação discreta, baseada apenas em seis classes de estabilidade e nas curvas de dispersão empíricas de Pasquill-Gifford. No AERMOD, a expansão do penacho é traduzida por funções contínuas, dependendo da turbulência, e é variável com a altitude; o modelo usa perfis de turbulência vertical e horizontal, obtidos a partir de medições e/ou por aplicação da teoria da CLA.

O tratamento do penacho pelos dois modelos difere, ainda, no que diz respeito à interacção com a camada de inversão.

Em condições convectivas, se a linha central do penacho estiver acima da altura de inversão, o ISCST3 assume concentração igual a zero ao nível do solo. O AERMOD adopta um tratamento diferente, procurando não subestimar as concentrações. Assim, no AERMOD a distribuição vertical da concentração é resultante da combinação de três tipos de penacho:

- um penacho “directo”, que sofre advecção em direcção ao solo devido a uma corrente descendente (não interage com o topo da camada de mistura);
- um penacho “indirecto”, que é arrastado numa corrente ascensional que atinge a camada de inversão, permanecendo junto ao topo da mesma antes de se misturar verticalmente em toda a espessura da CLA;
- um penacho que, devido à força de impulsão, penetra a inversão e se dispersa de forma mais lenta na camada estável superior, podendo retornar à camada de mistura e dispersar-se em direcção ao solo.

A consideração das correntes convectivas ascendentes e descendentes, através da aproximação da função de densidade de probabilidade, representa um avanço significativo relativamente ao ISCST3.

Em condições estáveis, a altura da inversão é ignorada pelo ISCST3, que assume uma altura infinita. O AERMOD considera uma camada de mistura mecânica junto ao solo e usa a reflexão do penacho numa inversão elevada para ter em conta os efeitos duma redução abrupta na turbulência em altitude.

O ISCST3 possui algoritmos opcionais para cálculo de deposição seca e húmida; à data da elaboração da presente dissertação, está já disponível para comentários do público uma versão provisória do AERMOD com estes algoritmos de cálculo incorporados.

### 3.3.2 Efeitos de esteira

O ISCST3 permite simular chaminés que sofram efeitos aerodinâmicos de esteira dos edifícios circundantes (*downwash*), embora de uma forma rudimentar. O ISCST3 não considera: a localização da chaminé relativamente aos edifícios, a deflexão das linhas de corrente, os efeitos na elevação do penacho, a relação entre o material do penacho capturado na esteira próxima e as concentrações na esteira distante, existindo descontinuidades na interface dos dois algoritmos de *downwash*. A direcção do vento não tem quaisquer efeitos em edifícios de forma achatada; o modelo estima concentrações excessivas em condições de vento fraco e de estabilidade, não confirmadas por observações. No sentido de obviar as limitações dos algoritmos de *downwash* do ISCST3, o Electric Power Research Institute (EPRI) patrocinou um estudo de desenvolvimento e avaliação de algoritmos novos, melhorados, para o cálculo da elevação dos penachos e efeito de esteira, para integração em modelos de qualidade do ar. Deste esforço resultou o modelo PRIME, acrónimo de “Plume Rise Model Enhancements”, que incorpora já um tratamento satisfatório dos factores referidos anteriormente, que foi demonstrado por comparação com resultados obtidos em ensaios de campo e de túnel de vento [Schulman *et al.*, 2000].

O conjunto de algoritmos PRIME foi incorporado na última versão do ISCST3, dando origem ao modelo ISC-PRIME, desenvolvido para a U.S. EPA. Os algoritmos do modelo PRIME foram também já incorporados no AERMOD.

### 3.3.3 Parametrização da CLA

A espessura da CLA e, consequentemente, a dispersão dos poluentes atmosféricos, são influenciadas, localmente, pelas características da superfície, nomeadamente pela rugosidade, pela reflectividade (ou albedo) e pela quantidade de água disponível. O modelo ISCST3 assume terreno descoberto e inclui as opções de simulação de modo rural ou modo urbano, aspecto que tem influência no tipo de coeficientes de dispersão usados. Para descrever a CLA, o ISCST3 requer a velocidade do vento, a altura da camada de mistura e as classes de estabilidade de Pasquill-Gifford. O AERMOD tem em consideração as características superficiais, através dos seguintes parâmetros de entrada, dependentes do uso do solo:

- Rugosidade superficial ( $z_0$ ), relacionada com a altura dos obstáculos à propagação do vento. Trata-se de uma escala de comprimento que parametriza a rugosidade do solo e representa a altura, acima do solo, a que a velocidade média horizontal do vento é nula. Pode tomar valores menores do que 0,001 m, como no caso de águas paradas, ou maiores do que 1 m, em áreas urbanas ou florestas;
- Razão de Bowen ( $\beta_0$ ), que é o quociente entre o fluxo de calor sensível e o fluxo de calor latente à superfície, sendo uma medida da disponibilidade de água na superfície. Varia entre 0,1 (água) e 10 (deserto);

- Albedo ( $r'$ ), a fracção da radiação solar incidente que é reflectida pela superfície para o espaço, sem absorção. Toma valores entre 0,1 (floresta de folha caduca) e 0,9 (neve recente).

Estes parâmetros dependem do tipo de uso do solo e variam com as estações do ano e com a direcção do vento, sendo definidos pelo utilizador. Com base nos valores destes três parâmetros e nas observações meteorológicas de superfície, o pré-processador AERMET calcula vários outros parâmetros necessários ao AERMOD: velocidade de atrito ( $u_*$ ), comprimento de Obukhov ( $L$ ), escala de velocidade convectiva ( $w_*$ ), escala de temperatura ( $\theta_*$ ), altura da camada de mistura ( $z_i$ ) mecânica e convectiva e fluxo de calor sensível na superfície ( $Q_H$ ) [Paumier e Brode, 1999].

O AERMOD usa relações de semelhança da camada superficial e de mistura, conjuntamente com valores medidos, para calcular perfis verticais de: direcção do vento, velocidade do vento ( $u$ ), desvios padrão lateral e vertical de turbulência ( $\sigma_v$ ,  $\sigma_w$ ), gradiente vertical de temperatura potencial ( $d\theta/dz$ ), e temperatura potencial ( $\theta$ ). Os perfis verticais das variáveis meteorológicas são construídos com base em valores medidos a vários níveis, e em extrapolações desses valores. Tem em conta a heterogeneidade vertical dos parâmetros da CLA nos cálculos de dispersão, usando valores efectivos, por exemplo, de velocidade do vento ou de turbulência, que são valores médios de uma camada limite atmosférica homogénea equivalente.

O ISCST3 utiliza dados meteorológicos obtidos a uma só altura, calculando o perfil vertical da velocidade do vento para determinar a velocidade ao nível do topo da chaminé, a partir do valor medido a um nível de referência. Considera as variáveis referidas ao nível do topo da chaminé para todas as distâncias a jusante da fonte. O AERMOD utiliza a informação meteorológica no cálculo da dispersão do penacho de forma mais elaborada do que o ISCST3, tendo em conta as variáveis medidas ao longo da espessura do penacho e a variação com a distância a jusante da fonte.

Os valores horários de altura da camada de mistura,  $z_i$ , calculados pelo pré-processador Rammet [U.S. EPA, 1999] para o ISCST3, baseiam-se no método de determinação de Holzworth, que entra em conta com os valores de  $z_i$  do princípio da manhã e do final da tarde, e com a categoria de estabilidade da hora que antecede o nascer do sol; para as categorias de estabilidade de Pasquill-Gifford E e F, o modelo ISCST3 ignora os valores interpolados e considera altura de camada de mistura ilimitada. A formulação do AERMOD é mais avançada neste aspecto, porque inclui uma componente mecânica de mistura e considera uma sequência mais realista das variações diurnas da altura de mistura.

### 3.3.4 Orografia

O ISCST3 distingue os seguintes três tipos de terreno:

- terreno simples, isto é, terreno plano, ou terreno elevado mas cuja altitude não ultrapassa o topo da chaminé em questão;
- terreno complexo, quando a cota do terreno excede a altura da chaminé em análise;
- terreno intermédio, caso particular do anterior, em que as cotas são superiores à altura de emissão mas inferiores à altura da linha central do penacho.

O ISCST3 pode ser aplicado aos três tipos de terreno; no entanto, em terreno complexo deve ser usado como método expedito, fornecendo estimativas conservadoras do impacto da fonte na qualidade do ar [U.S. EPA, 1995b]. Dependendo do tipo de terreno, que o utilizador terá que especificar, são usados algoritmos de cálculo diferentes.

O modelo considera que a altura da camada de mistura acompanha o terreno – isto é, a altura acima do solo é a mesma no receptor e junto à fonte – e que a velocidade do vento é função da altura acima do solo, de acordo com a lei do perfil da potência.

Em terreno elevado simples, a linha central do penacho mantém-se horizontal, ou seja, em cada receptor a altura do eixo do penacho – designada por altura de estabilização em relação ao nível do mar –, corresponde à soma da altura efectiva de emissão e da diferença entre as cotas do terreno na base da chaminé e no receptor. A Figura 3 [U.S. EPA, 1995a] ilustra o princípio do ajuste ao terreno usado pelo ISCST3, no caso de terreno simples elevado.

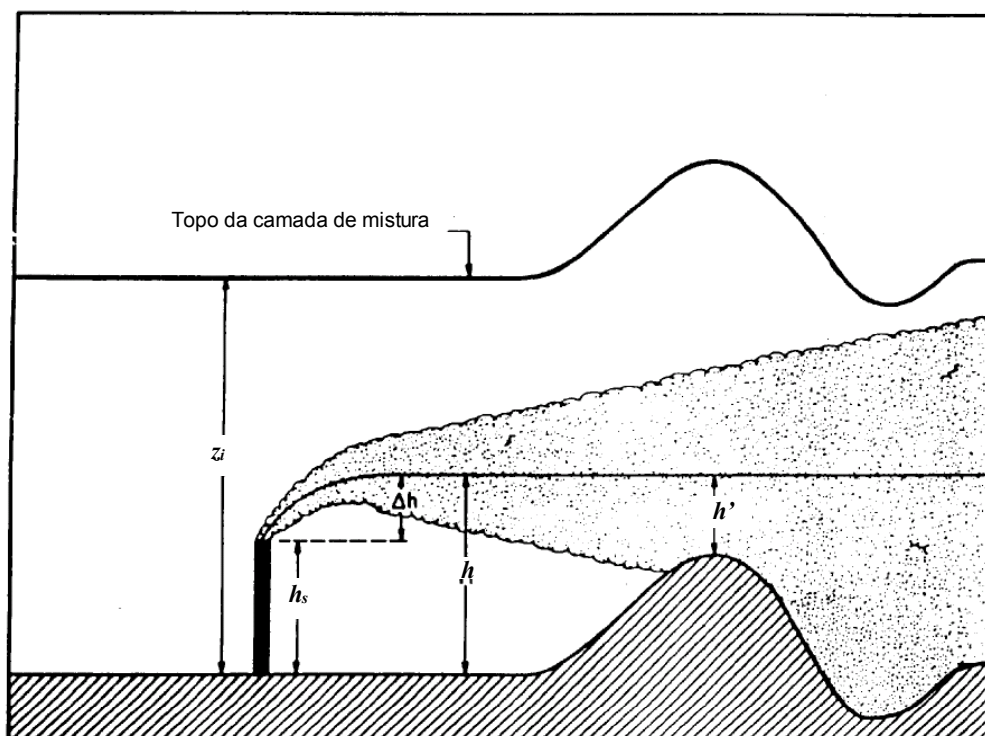


Figura 3 – ISCST3: representação do comportamento do penacho em terreno simples elevado

Em terreno complexo, o algoritmo expedito usado pelo ISCST3 é baseado na aplicação da equação de penacho Gaussiano a sectores de 22,5°, sendo a distribuição das concentrações ao longo de cada sector uniforme (ou seja, não é usado o coeficiente de dispersão transversal,  $\sigma_y$ ).

Na equação Gaussiana, a altura efectiva é substituída pela altura efectiva de estabilização. Em condições estáveis (classes E e F), o eixo do penacho permanece à altura de estabilização acima do nível do mar; em condições instáveis e neutras (classes A a D), no entanto, o penacho sofre uma deflexão no sentido ascendente que é traduzida pela aplicação, no cálculo da altura efectiva de estabilização, de um factor de ajuste ao terreno, correspondente a metade da altitude do receptor relativamente ao nível da base da chaminé. A linha central do penacho mantém-se sempre a uma altura mínima de 10 m acima do solo.

Em condições de estabilidade, a deflexão do penacho, originada pela presença de obstáculos em terreno complexo, é considerada por aplicação de um factor de atenuação à concentração estimada no sector; este factor é igual a 1 em atmosfera livre, antes de o penacho sofrer a influência do terreno, decresce linearmente com a altura do receptor acima do penacho até atingir o valor zero para aqueles receptores localizados a pelo menos 400 m acima da altura da linha central não perturbada do penacho.

Usando uma aproximação relativamente simples, o AERMOD incorpora os conceitos actuais relativos à dispersão em terreno complexo, modelando o penacho a embater no terreno e/ou a seguir a sua topografia. Esta aproximação foi adoptada de forma a ser representativa da realidade, ser fácil de implementar, e permitir tratar todos os tipos de terreno de forma consistente e contínua, sem exigir que o terreno seja classificado *a priori*, como no caso do ISCST3.

Em terreno complexo, o comportamento do escoamento (incluindo o penacho) é distinto em função das condições de estabilidade atmosférica:

- Condições estáveis: o AERMOD assume o desenvolvimento de uma estrutura de duas camadas, separadas, do ponto de vista conceptual, por uma linha de divisão do escoamento à altura  $H_c$ ; a camada inferior mantém-se horizontal, enquanto a camada superior tende a elevar-se, acompanhando o terreno;
- Condições neutras ou instáveis: a camada inferior desaparece e todo o escoamento tende a acompanhar o terreno ( $H_c = 0$ ).

Assumindo que a velocidade do vento aumenta com a altitude, a altura  $H_c$  pode ser interpretada como o nível, na atmosfera estável, a que o escoamento tem energia cinética suficiente para contrariar a estratificação e elevar-se seguindo a topografia do terreno. Em condições atmosféricas estáveis, um penacho que esteja inserido num escoamento abaixo de  $H_c$  tenderá a permanecer horizontal, podendo contornar uma dada colina ou colidir contra ela; pelo contrário, situando-se totalmente acima, irá elevar-se e transpô-la, à semelhança do que acontece em condições neutras e convectivas.

Em cada receptor, o AERMOD calcula a concentração como uma soma ponderada de duas estimativas, correspondentes à situação do penacho horizontal que embate no terreno e à situação do penacho que acompanha verticalmente o terreno, mantendo-se a sua linha central

sempre à mesma altura acima do solo. Em condições estáveis, se o penacho se encontrar totalmente abaixo de  $H_c$ , a concentração é determinada apenas pela contribuição do penacho horizontal; encontrando-se acima de  $H_c$ , ou sob condições neutras ou instáveis, a concentração pondera as duas contribuições – ou seja, neste caso é sempre considerada uma componente horizontal, procurando simular a tendência do penacho de aproximação ao terreno e difusão para os lados, ao mesmo tempo que é deflectido verticalmente. O peso relativo de cada contribuição depende do grau de estabilidade atmosférica, da velocidade do vento e da altura do penacho em relação ao solo. Em terreno plano, as duas contribuições são ponderadas de igual forma. No cálculo de  $H_c$  é usada a escala de altura do terreno  $h_c$  calculada pelo AERMAP.

### 3.3.5 Dados de entrada

O AERMOD e o ISCST3 requerem informação relativa a: meteorologia, emissões atmosféricas e orografia.

Em particular, os modelos necessitam dos seguintes dados de entrada:

#### 1. ISCST3

- Características das fontes emissoras: coordenadas de localização, altura física e diâmetro interno da secção de saída das chaminés, taxa de emissão de poluente (constante ou variável, podendo ser usada informação horária), temperatura e velocidade de exaustão dos efluentes gasosos;
- Dados meteorológicos horários: valores médios horários dos parâmetros direcção e velocidade do vento, temperatura ambiente, classe de estabilidade, alturas de camada de mistura rural e urbana;
- Cotas do terreno nos receptores;
- Dimensões dos edifícios próximos das chaminés.

#### 2. AERMOD

- Dados das fontes: semelhante ao ISCST3;
- Dados meteorológicos: valores médios horários de direcção e velocidade do vento, temperatura ambiente e nebulosidade (requisitos mínimos);
- Especificação de parâmetros característicos da camada superficial;
- Modelo digital do terreno;
- Dimensões dos edifícios próximos das chaminés.



### 3.3.5.1 *Dados meteorológicos*

O AERMOD requer dois ficheiros de dados meteorológicos de entrada, fornecidos pelo pré-processador meteorológico AERMET [Paumier e Brode, 1999]. Um dos ficheiros inclui parâmetros da camada limite superficial; o outro ficheiro contém perfis verticais de variáveis, como a velocidade do vento, direcção do vento e parâmetros de turbulência.

Uma das limitações da aplicação do AERMOD a Portugal reside no facto de o AERMET requerer informação sobre a estrutura térmica da atmosfera antes do nascer do sol, para estimar a evolução da camada limite convectiva ao longo do dia. O AERMET usa, presentemente, a sondagem em altitude das 12h TU para este mesmo efeito. A aplicação do AERMET é restringida, assim, às longitudes em que a sondagem das 12h TU corresponde ao início da manhã [Paumier e Brode, 1999].

Uma forma de ultrapassar este problema, passa pela utilização de um pré-processador alternativo ao AERMET. Existem no mercado versões comerciais do AERMOD que incluem pré-processadores modificados, utilizando módulos de cálculo adaptados, sem recurso a sondagens, aplicáveis na Europa.

O recurso a modelos numéricos de previsão do tempo para calcular os parâmetros da CLA estimados pelo AERMET – velocidade de atrito, fluxo de calor sensível, comprimento de Obukhov – é outra alternativa à utilização do AERMET da U.S. EPA. Os parâmetros da CLA nem sempre são fornecidos directamente pelo modelo numérico, podendo ser necessário um pós-processamento adicional. Como exemplo, refere-se um estudo comparativo da utilização do modelo meteorológico Hirlam (High Resolution Limited Area Model) e de dados medidos num mastro meteorológico [Omstedt, 2001]. O modelo Hirlam calcula os fluxos superficiais mas não os fornece como *output*, tendo sido usado, complementarmente, o sistema de análise MESAN, que fornece as variáveis não disponibilizadas pelo Hirlam.

A utilização de informação meteorológica produzida pelo modelo de mesoscala RAMS para introduzir no pré-processador AERMET foi também analisada [Grifoni *et al.*, 2002], embora numa perspectiva de utilização complementar, em casos particulares de aplicação do AERMOD. As conclusões obtidas sugerem que a aplicação do RAMS, como pré-processador do AERMOD, é uma possibilidade interessante a considerar em situações específicas, em que os custos computacionais da sua utilização sejam justificados, como em aplicações do AERMOD a zonas costeiras complexas – em que os cálculos do RAMS traduzem os ventos locais e as brisas de terra e de mar – ou quando os resultados do AERMOD se aproximem dos valores limite legislados, permitindo refinar os resultados obtidos. Em situações menos críticas, o AERMOD pode ser usado isoladamente com bons resultados. Para além das variáveis vento, temperatura e humidade, é possível retirar do RAMS alturas da camada de mistura, rugosidade superficial, nebulosidade, velocidade de atrito e fluxo de calor.

No caso da presente dissertação, foi utilizado o pré-processador BREEZE AERMET Pro v3.1.0, comercializado pela empresa norte-americana *Trinity Consultants Inc.* (Dallas, Texas). Este *software* inclui o módulo PBLAER, que calcula a altura da camada de mistura na ausência de dados de sondagens atmosféricas, ou quando as observações aerológicas disponíveis (tipicamente 00 TU e 12 TU) não correspondem aproximadamente à hora do nascer do sol.

O AERMET Pro requer, como dados de entrada para a utilização do módulo PBLAER estando o modo aerológico desactivado, observações horárias dos seguintes parâmetros meteorológicos:

- Medidas de superfície de velocidade do vento (velocidade do vento de referência, entre  $7z_0$  e 100 m), de direcção do vento e de temperatura ambiente (medida a uma altura entre  $z_0$  e 100 metros);
- Nebulosidade;
- Características superficiais (rugosidade da superfície, razão de Bowen e albedo).

O ISCST3 requer dados horários dos seguintes parâmetros meteorológicos:

- Medidas de superfície de velocidade do vento (entre  $7z_0$  e 100 m), de direcção do vento e de temperatura ambiente;
- Estimativa das classes de estabilidade de Pasquill-Gifford;
- Estimativa da altura da camada de mistura rural e urbana.

Tendo em vista aproximar, tanto quanto possível, os dados de entrada dos dois modelos, o ficheiro meteorológico de entrada no ISCST3 foi construído a partir dos ficheiros de entrada no AERMOD (ficheiro de parâmetros da camada limite superficial e ficheiro de perfis verticais). Os valores horários de temperatura, velocidade do vento, direcção do vento e altura da camada de mistura foram obtidos directamente daqueles ficheiros. As classes de estabilidade foram determinadas a partir dos valores horários do comprimento de Obukhov, incluídos no ficheiro de parâmetros da camada superficial. A relação usada tem por base a relação de Golder [Golder, 1972] entre o comprimento de Obukhov ( $L$ ) e a rugosidade superficial ( $z_0$ ), para várias classes de estabilidade - Figura 4 [Seinfeld e Pandis, 1998] - tendo esta relação sido modificada considerando que, para valores absolutos de  $L$  maiores do que 100 metros, são aplicáveis as equações de camada de mistura neutra – princípio em que se baseia o método de cálculo da altura da camada de mistura usado pelo AERMET Pro [Trinity Consultants, 1994].

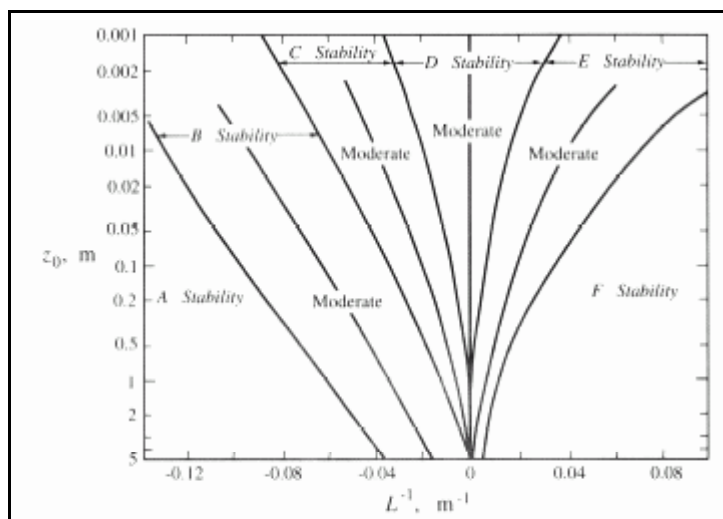


Figura 4 – Relação entre o comprimento de Obukhov  $L$  e a rugosidade superficial  $z_0$  para várias classes de estabilidade de Pasquill-Gifford

### 3.3.5.2 Dados topográficos

Relativamente à forma como é descrita a orografia, ambos os modelos utilizam a cota do terreno em cada ponto receptor. O AERMOD requer, também, uma escala de terreno associada a cada receptor, calculada pelo pré-processador de terreno AERMAP [Eckhoff, 2003], a partir do modelo digital do terreno. Este valor é utilizado pelo AERMOD no cálculo da altura crítica de divisão das linhas de corrente (*critical dividing streamline height*).

Não sendo possível obter um modelo digital de terreno no formato requerido pelo AERMAP da U.S. EPA (formato DEM), existem versões comerciais do AERMOD que aceitam ficheiros de terreno com formato ASCII do tipo XYZ, convertendo-os ao formato DEM requerido pela versão do AERMAP. No caso da presente dissertação, foi utilizado o pré-processador BREEZE AERMAPr v.99211, incluído no pacote BREEZE AERMOD SUITE v3.3.2, comercializado pela empresa norte-americana Trinity Consultants Inc. (Dallas, Texas).

## 3.4 Avaliação dos modelos

O AERMOD tem sido objecto de uma avaliação bem documentada [Paine *et al.*, 1998; U.S. EPA, 2003a], incluindo a comparação do seu desempenho com o do ISCST3 [Hall *et al.*, 2000a,b; Hall *et al.*, 2001; Hanna *et al.*, 2001; Hall *et al.*, 2002; Spanton *et al.*, 2005].

O AERMOD (versão 02222) foi aplicado a várias bases de dados de avaliação, sem e com efeitos de *downwash* aerodinâmico devido à presença de edifícios próximos, em condições de simulação distintas [Paine *et al.*, 1998; U.S. EPA, 2003a]. O estudo realizado na ausência de efeitos de *downwash* incluiu 4 séries de dados, obtidas em experiências de campo de curta duração com traçadores, e 6 séries temporais longas de monitorização convencional de dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ). A descrição seguinte resume a metodologia usada e os resultados obtidos.

Nos estudos com traçadores, quando a densidade espacial dos amostradores era grande, a avaliação baseou-se na análise do erro médio do modelo, ou “resíduo”, recorrendo à análise gráfica da razão entre as concentrações estimadas e observadas para pares de dados com correspondência no tempo (gráficos de resíduos), em função da distância a jusante da fonte e para cada regime de estabilidade (convectivo e estável). Foram consideradas as concentrações máximas - observada e estimada - em cada arco de amostradores, e não em cada amostrador individual, para eliminar o efeito da incerteza da direcção do vento na avaliação dos resultados. Os dados de base são dados médios de 1 hora.

O desempenho operacional do AERMOD, na verificação do cumprimento das normas de qualidade do ar, foi avaliado comparativamente com o do ISCST3, e de outros modelos, através da utilização de gráficos de quantil-quantil. Estes gráficos foram usados especialmente para comparar valores máximos, sem atender à sua localização ou ao momento específico em que ocorreram; as séries de resultados dos modelos e a série de observações de qualidade do ar, ordenadas de forma decrescente, são comparadas graficamente, de forma que os valores graficados, de ambas as séries, não têm correspondência entre si, no tempo e no espaço. Esta análise foi preferida ao diagrama de dispersão de pares de dados estimados e observados num mesmo local e momento, dadas as incertezas associadas às medidas de direcção do vento.

Relativamente à avaliação com base em séries temporais longas, o estudo salienta o facto de as incertezas devidas à combinação de erros na medição de  $\text{SO}_2$  - provenientes do tratamento do limite de detecção dos analisadores e dos desvios do zero ignorados - e às concentrações de fundo se reflectirem na fiabilidade das concentrações observadas, particularmente em termos de médias anuais. Os valores de pico de médias de curta duração não são significativamente afectados, porque a incerteza é uma pequena parte percentual do valor reportado. Para as séries longas, a análise baseia-se num só par de dados seleccionado para cada período de tempo, correspondente à concentração máxima observada e estimada em toda a área de estudo. São reportados resultados para períodos de 3 horas, 24 horas e anuais (não são reportados dados para períodos de 1 hora).

As diferenças entre o AERMOD e o ISCST3 foram avaliadas, ainda, através do teste estatístico da concentração máxima robusta (*robust highest concentration*, RHC); trata-se de um parâmetro estatístico que representa uma estimativa “suavizada” das concentrações máximas, baseado num ajuste exponencial aos valores mais altos da distribuição de concentrações. Desta forma, reduz-se a influência dos extremos das séries na avaliação dos resultados do modelo.

Foi calculado o quociente entre o valor de RHC dos valores estimados pelos modelos e o correspondente valor de RHC das observações. Os resultados globais obtidos na avaliação do AERMOD (versão 02222), para as bases de dados sem efeitos de *downwash*, resumem-se em seguida [U.S. EPA, 2003a]:

- Concentrações médias de curta duração: para os vários locais obtiveram-se valores compreendidos entre 0,76 e 1,35, sendo o valor global (média geométrica) de 1,03;
- Concentrações médias anuais: obtiveram-se valores compreendidos entre 0,30 e 1,64, e um valor global de 0,73.

A razão entre estimativas/observações obtida no caso do AERMOD não variou significativamente entre terreno simples e terreno complexo, ao contrário do ISCST3, em que a razão média variou entre 0,96 para terreno simples e 6,4 para terreno complexo.

Da avaliação feita, a U.S. EPA conclui que o desempenho do AERMOD foi globalmente melhor do que o do ISCST3, especialmente em situações de terreno complexo.

A aplicação de diferentes modelos de dispersão atmosférica para fins regulamentares coloca problemas de ordem prática, no caso de os resultados obtidos diferirem significativamente. A Agência Ambiental do Reino Unido desenvolveu um protocolo com o objectivo de evidenciar as diferenças entre o ISCST3 e dois modelos Gaussianos de segunda geração, utilizados no Reino Unido para fins regulamentares [Hall *et al.*, 2002]: o AERMOD e o ADMS [Carruthers *et al.*, 1994]. Os modelos foram comparados entre si por aplicação a vários casos teste, englobando diferentes tipos de terreno, alturas de chaminé, configurações de edifícios próximos, etc. Esta abordagem foi preferida à comparação com dados experimentais, que limitaria a análise às condições prevalentes nos ensaios. O trabalho realizado para a Agência Ambiental do Reino Unido [Hall *et al.*, 2000a,b] foi precedido de uma pesquisa bibliográfica que envolveu 120 artigos relacionados com os modelos em análise; destes artigos, apenas 10 comparavam directamente os modelos de segunda geração, entre si ou com o ISCST3, e apenas 4 incluíam uma análise sistemática de situações de dispersão bem definidas. A influência do terreno e dos edifícios próximos foram aspectos insuficientemente analisados, que o trabalho para a Agência Ambiental pretendeu colmatar. O estudo realizado evidencia diferenças significativas entre as concentrações máximas obtidas pelos três modelos: cerca de 35% dos valores do quociente entre a concentração máxima estimada pelo ISCST3 e a estimada pelo AERMOD foram altos (superiores a 2) e 3% baixos (inferiores a 0,5%). De uma forma geral, o ISCST3 estimou concentrações máximas maiores do que o AERMOD; não foi possível, no entanto, identificar padrões consistentes nas diferenças observadas, dada a resposta dos modelos avançados aos diferentes parâmetros de entrada ser complexa [Hall *et al.*, 2001].

No presente capítulo foram analisadas as principais características dos modelos ISCST3 e AERMOD e foram descritos alguns estudos de avaliação comparativa do AERMOD e ISCST3. O estudo realizado pela U.S. EPA [U.S. EPA, 2003a], com base em séries longas de monitorização de SO<sub>2</sub>, propõe a aplicação de indicadores de qualidade apropriados à natureza dos dados, como os gráficos quantil-quantil e o parâmetro RHC, e alerta para o facto de as incertezas associadas aos dados de monitorização contínua de SO<sub>2</sub> condicionarem a comparação de dados estimados e observados, à excepção dos valores de pico para médias de curta duração. Na aplicação dos

modelos ao caso de estudo, descrito no capítulo seguinte, foram tidas em consideração a metodologia de avaliação e as conclusões referidas.

## 4 DESCRIÇÃO DO CASO DE ESTUDO

No âmbito da presente dissertação, foi escolhida uma situação real de aplicação, em Portugal, dos dois modelos de dispersão de primeira e segunda geração descritos no capítulo anterior, com o objectivo de, por um lado, avaliar as limitações da sua utilização, face à natureza e ao formato da informação existente e, por outro lado, avaliar comparativamente o seu desempenho, confrontando estimativas com dados reais obtidos em estações de qualidade do ar.

Os critérios que determinaram a escolha da(s) fonte(s) a simular foram os seguintes:

- Simplicidade do caso de estudo, de preferência por aplicação ao menor número possível de fontes pontuais de emissão do poluente em causa, de influência marcada e inequívoca na qualidade do ar envolvente;
- Minimização de efeitos de interferência de outras fontes disseminadas;
- Existência de informação horária de emissões atmosféricas, de qualidade do ar e de meteorologia, em condições de ser disponibilizada em tempo útil.

O caso de estudo seleccionado centrou-se na análise comparativa do desempenho do ISCST3 e do AERMOD, por aplicação à região do Pego (Abrantes), tendo sido simulada, por ambos os modelos, a dispersão das emissões de  $\text{SO}_2$  da Central Termoeléctrica do Pego.

A escolha do poluente  $\text{SO}_2$  é justificada, por um lado, por se tratar de um poluente que se pode considerar, à escala em análise, como não reactivo, adequado ao tipo de modelos em estudo e, por outro, por existir um número reduzido de fontes deste poluente na região - comparativamente a outros poluentes, como os óxidos de azoto ou as partículas, emitidos não só por grandes fontes pontuais como por um grande número de pequenas fontes não pontuais disseminadas pela região, como o tráfego rodoviário.

A zona de Abrantes é uma zona pouco industrializada, sendo a Central do Pego a fonte de  $\text{SO}_2$  mais importante na região de estudo.

O estudo centrou-se na análise de um ano recente de dados, o ano de 2003.

### 4.1 Central Termoeléctrica do Pego

A Central Termoeléctrica do Pego é propriedade da empresa TEJO ENERGIA – Produção e Distribuição de Energia Eléctrica, S.A., que detém a licença de exploração da Central e o contrato de venda de energia com a Rede Eléctrica Nacional (REN). A exploração da Central é da responsabilidade da empresa PEGOP – Energia Eléctrica, S.A., que assegura a sua manutenção e operação.

A Central Termoelétrica do Pego é destinada à produção de energia eléctrica, estando localizada no concelho de Abrantes (distrito de Santarém), nas freguesias do Pego e Concavada. Está situada a cerca de 8 km a Este da cidade de Abrantes (Figura 5).



Figura 5 – Localização da Central Termoelétrica do Pego (Base cartográfica: carta hipsométrica do Instituto Geográfico e Cadastral, de 1974, à escala 1:500.000)

As povoações mais próximas são: Pego (cerca de 3 km a Oeste da Central), Concavada (3 km a Sudeste), Mouriscas (4 km a Norte) e Alvega (5 km a Este). Os terrenos da Central são marginados a Norte pelo rio Tejo, tal como ilustra a Figura 6.

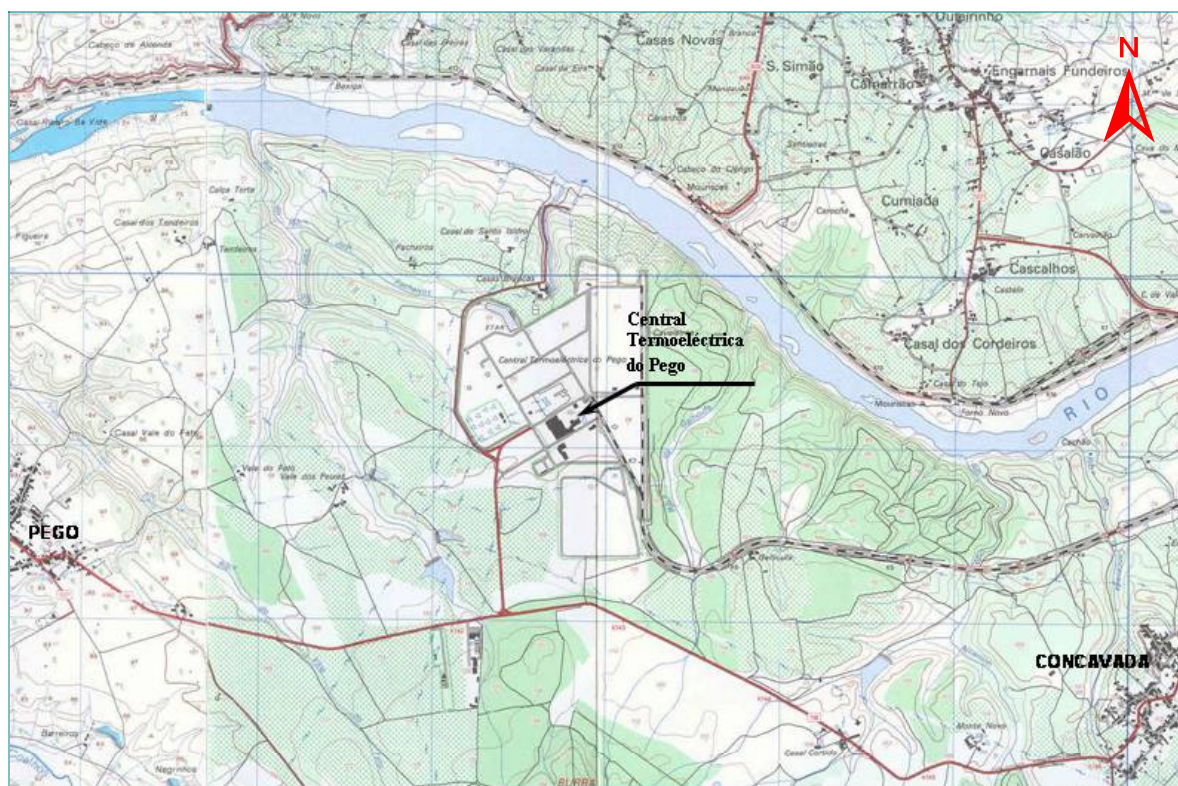


Figura 6 – Implantação da Central Termoelétrica do Pego (escala aproximada: 1:45.000)



A Central do Pego é uma central termoelétrica convencional, que produz energia elétrica por queima de carvão (combustível), fonte de energia. Deste processo de combustão resultam emissões de gases para a atmosfera e, ainda, de cinzas de carvão, sob a forma de escórias e de cinzas volantes.

A Central é constituída por dois grupos geradores idênticos, com uma potência elétrica unitária de 314 MW. A potência térmica total é da ordem dos 1.632 MW. Cada um dos grupos inclui um gerador de vapor, um grupo turbo-alternador e um transformador principal.

Na Figura 7 (URL 3) apresenta-se o fluxograma geral simplificado do processo.

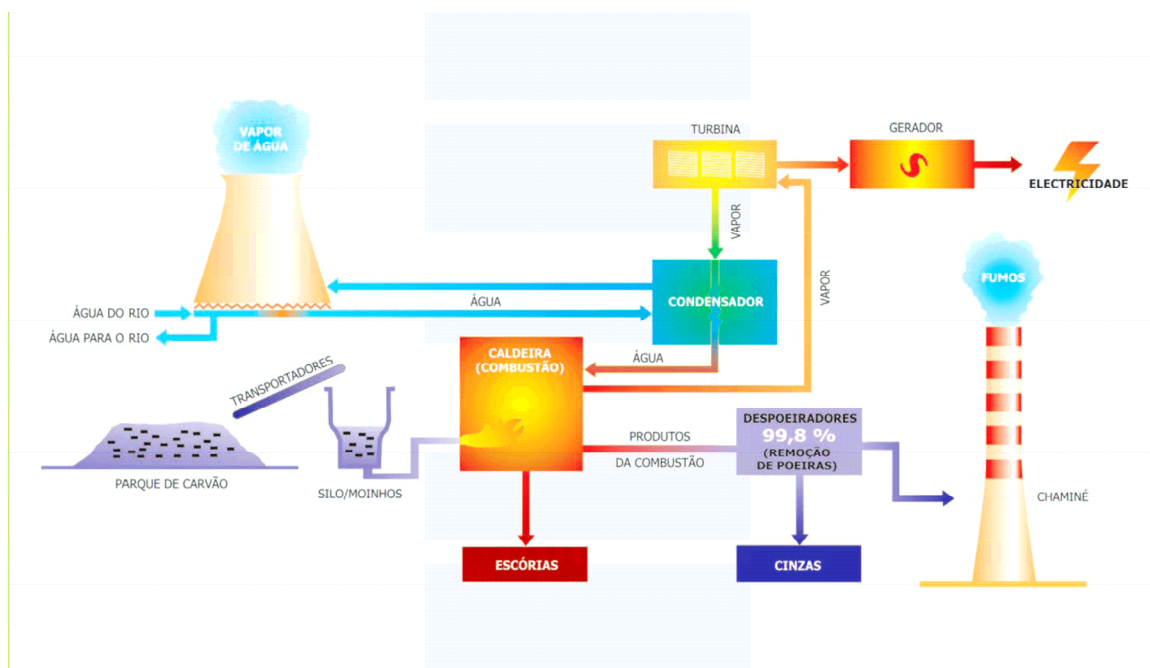


Figura 7 – Central Termoelétrica do Pego: fluxograma geral

O carvão, importado, de tipo betuminoso, é transportado em navios de grande tonelagem e descarregado no Porto de Sines, onde se procede ao seu manuseamento e carga em vagões com destino ao Pego. O acesso ferroviário é feito a partir da Linha da Beira Baixa, através de um ramal ferroviário construído para o efeito, que inclui uma ponte para atravessamento do Tejo. Já na Central, o carvão é armazenado num parque apropriado para o efeito.

Por cada um dos dois grupos geradores de vapor existe uma caldeira, instalada em edifício fechado. O carvão, previamente pulverizado em moinhos, é queimado na câmara de combustão da caldeira. O fuelóleo é usado como combustível auxiliar, em situações de arranque dos grupos ou de variação de carga.

Do fundo da câmara de combustão são retiradas cinzas de carvão sob a forma de escória; as escórias são arrefecidas por água e transportadas por camião para o parque de cinzas e escórias, local onde ficam depositadas.

Os gases quentes, saídos da câmara de combustão, transmitem calor ao vapor e à água que circulam na caldeira e aquecem, ainda, o ar de combustão. Antes de serem lançados para a atmosfera, os gases de combustão, aspirados pelos ventiladores de tiragem, passam por despoeiradores (precipitadores electrostáticos) que retêm a quase totalidade das cinzas volantes arrastadas, evitando a sua emissão para a atmosfera. As cinzas volantes recolhidas são armazenadas em silos, até serem conduzidas ao local de destino. Cerca de 97% das cinzas produzidas constituem um subproduto para utilização na indústria betoneira e cimenteira; as cinzas que, pelas suas características, não podem ser aproveitadas, são ainda valorizadas, em parte, na produção de betão, e a quantidade restante é depositada no parque de cinzas.

O calor libertado na combustão produz vapor no gerador de vapor que, após secagem e sobreaquecimento, segue através de tubagens de interligação para a turbina.

A turbina é accionada pelo vapor proveniente do gerador de vapor, produzindo energia mecânica, a qual será transformada em energia eléctrica através do respectivo alternador, sendo a sua tensão elevada no transformador principal.

Após passagem pela turbina, a água volta ao estado líquido no condensador principal. A água condensada volta a ser usada num novo ciclo de produção de vapor. O arrefecimento do condensador principal da turbina é feito por circulação de água de arrefecimento, em circuito fechado entre o condensador e uma torre de refrigeração. Parte da água utilizada, captada no rio Tejo, é restituída ao rio através da purga das torres de refrigeração, sendo um pequeno caudal rejeitado como efluente líquido tratado. A restante água captada é libertada para a atmosfera por evaporação nas torres de refrigeração.

#### **4.1.1 Descarga e monitorização de efluentes gasosos**

A Central do Pego possui duas fontes pontuais principais de emissões para a atmosfera, com origem nas duas caldeiras de geração de vapor dos grupos 1 e 2 da Central, que emitem de forma contínua. Os efluentes gasosos das duas fontes principais – gases de combustão resultantes da queima de carvão – são aspirados pelos ventiladores de tiragem e, após a passagem pelos precipitadores electrostáticos, são libertados para a atmosfera através de uma chaminé multicanal, com duas fugas independentes. A chaminé é constituída por um fuste de betão armado, no interior do qual se encontram as duas condutas de fumos, uma por cada grupo, com 225 metros de altura e dimensionadas de forma a imprimir uma velocidade de exaustão adequada, superior a  $20 \text{ m.s}^{-1}$  na secção de saída da chaminé (velocidade máxima de  $25 \text{ m.s}^{-1}$ ), para promover uma boa dispersão atmosférica dos efluentes gasosos. A chaminé tem forma hiperbólica, à excepção da zona do topo, que tem forma cilíndrica e é feita de aço inoxidável. O diâmetro interno das fugas independentes, ou chaminés – como passarão a ser designadas seguidamente – é variável em altura, entre 6 m na zona de entrada do gás e 4,8 m na secção de saída.

Existe uma plataforma, situada ao nível de 87 m, usada para amostragem pontual de efluentes gasosos e para monitorização em contínuo de SO<sub>2</sub>, óxidos de azoto (NO<sub>x</sub>) e partículas, poluentes maioritários emitidos pela Central. A este nível, o diâmetro interno da chaminé é de 5,1 metros.

Adicionalmente, são medidos em contínuo os parâmetros operacionais oxigénio (O<sub>2</sub>), temperatura e velocidade de saída dos gases. A medida da concentração volúmica de oxigénio nos gases de combustão é usada para a correcção dos valores obtidos para o SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> e partículas, face à percentagem de oxigénio. A medição da velocidade permite o cálculo dos caudais de efluentes gasosos emitidos por cada grupo. Para aplicação dos modelos, foi calculada a velocidade de saída dos gases a partir da velocidade medida, considerando a relação existente entre os diâmetros das secções de monitorização e de saída.

#### 4.1.2 Regime de funcionamento e emissões atmosféricas de SO<sub>2</sub>

A Central do Pego foi concebida para produção de energia na base do diagrama de cargas, com uma taxa de disponibilidade elevada. A Central garante uma produção anual de cerca de 5.000 GWh, considerando uma utilização média da potência instalada nos dois grupos superior a 90%.

As emissões de SO<sub>2</sub> da Central provêm do enxofre contido no carvão, usado como combustível. O teor máximo de enxofre dos carvões consumidos pela Central é inferior a 1,2% (em massa).

No Quadro 1 apresentam-se dados de produção da Central do Pego, bem como as emissões específicas de SO<sub>2</sub>, expressas em termos de g.kWh<sup>-1</sup>, relativos ao período 2000-2003 (URL 3).

Quadro 1 – Dados de produção e emissão específica de SO<sub>2</sub> da Central Termoeléctrica do Pego, de 2000 a 2003

	2000	2001	2002	2003
Electricidade produzida pela Central (GWh)	4956	4317	5167	4504
Rendimento da Central (%)	38,4	37,7	38,4	38,1
Energia consumida pela Central (GWh)	352	318	370	327
Emissão específica de SO <sub>2</sub> para a atmosfera (g.kWh <sup>-1</sup> )	4,13	4,38	4,11	4,39

No Quadro 2 apresentam-se as principais características das fontes de emissão. Os valores médios de temperatura e de velocidade são relativos a 2003.

Quadro 2 – Características das fontes de emissão da Central do Pego

Características das fontes de emissão (2003)	Chaminé 1 (Grupo I)	Chaminé 2 (Grupo II)
Altura das chaminés (m)	225	225
Diâmetro interno de saída (m)	4,8	4,8
Temperatura média dos efluentes gasosos à saída da chaminé (°C)	138	138
Velocidade média dos efluentes gasosos à saída da chaminé (m.s <sup>-1</sup> )	22,5	22,4

Trata-se, assim, de duas fontes de emissão elevadas, com uma velocidade vertical de saída do efluente suficientemente alta para evitar os efeitos de *downwash* originados pela própria chaminé - em 98% das horas a velocidade do vento é menor ou igual a 5 m.s<sup>-1</sup>, pelo que a relação entre a velocidade de saída do efluente gasoso e a velocidade do vento ao nível do topo da chaminé é superior a 1,5, condição suficiente para evitar o *downwash* [Schnelle, 2000]. Salienta-se que as condições de descarga referidas são condições médias verificadas em 2003, tendo havido períodos com velocidade de emissão mais baixa do que a referida.

Apresentam-se, no Quadro 3, as concentrações médias nos efluentes gasosos e as quantidades anuais emitidas de SO<sub>2</sub>, no período de 2000 a 2003, para os dois grupos da Central do Pego.

Quadro 3 – Valores médios de concentração de SO<sub>2</sub> nos efluentes gasosos (6% O<sub>2</sub>, gás seco) e massa total emitida anualmente, no período 2000-2003

SO <sub>2</sub>	2000		2001		2002		2003	
	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 1	Grupo 2
Concentração (mg. Nm <sup>-3</sup> )	1.391	1.346	1.481	1.386	1.399	1.266	1.399	1.266
Emissão anual (kton)	10,0	10,5	9,9	9,0	10,3	10,3	9,6	9,6

Ao longo do ano as emissões variam consideravelmente, dependendo do regime de funcionamento da Central, também variável, tendo-se optado por usar, como dados de entrada dos modelos, informação horária de emissões.

No Quadro 4 apresenta-se uma síntese dos dados de emissão de SO<sub>2</sub> da Central do Pego, verificados em 2003.

Quadro 4 – Dados de emissão de SO<sub>2</sub> da Central do Pego, relativos a 2003

Dados de emissão (2003)	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 1+2 *
Emissão de SO <sub>2</sub> (kton.ano <sup>-1</sup> )	9,6	9,6	19,1
Emissão média efectiva de SO <sub>2</sub> ** (g.s <sup>-1</sup> )	362,3	336,8	635,7
Taxa média anual de emissão de SO <sub>2</sub> (g.s <sup>-1</sup> )	303,2	303,2	606,5
% do tempo com emissão acima da taxa média anual	-	-	65% (5735 h)
Intervalo de variação de emissão de SO <sub>2</sub> (g.s <sup>-1</sup> )	0 - 469	0 - 494	0 - 918
Emissão de SO <sub>2</sub> – Nº horas sem emissão ou dados inválidos	1428	872	403
Emissão de SO <sub>2</sub> – Nº horas do ano a emitir	7332	7888	8357

\*Emissões dos grupos 1 e 2 consideradas em conjunto.

\*\*Valor médio calculado para o total de horas com emissão de SO<sub>2</sub>.

Os períodos sem registos de emissão (devido a paragem da Central ou a anomalias no sistema de monitorização de emissões) representam menos de 5% do total das horas anuais. Em 2003, a Central funcionou com um só grupo cerca de 22% do tempo (1900 horas).

## 4.2 Caracterização da região de estudo

No presente capítulo é feita uma breve descrição da região envolvente da Central do Pego e, em particular, da área considerada nas simulações de qualidade do ar, incluindo a sua orografia, características superficiais e meteorologia. O pré-processamento de dados de altimetria do terreno e de dados meteorológicos é também descrito neste capítulo.

### 4.2.1 Área de simulação

O domínio considerado nas simulações, representado na Figura 8, foi seleccionado de forma a abranger a Central do Pego e todas as estações da RMQA – Abrantes, Pego, Mouriscas, Mação, Gavião e S. Facundo (capítulo 4.3) – e, ainda, uma zona topograficamente mais elevada, situada a Nordeste da Central.



4. DESCRIÇÃO DO CASO DE ESTUDO

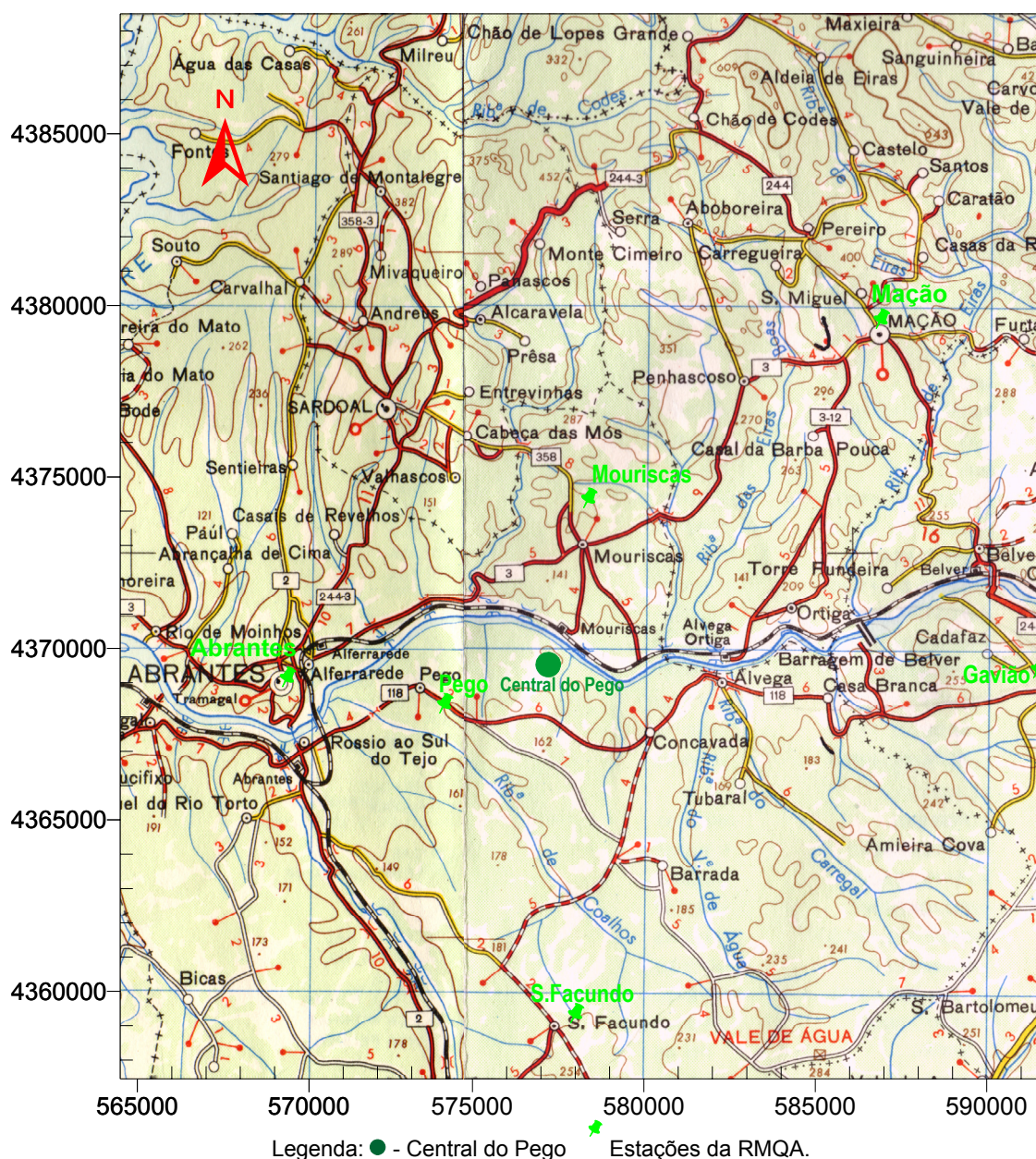


Figura 8 – Domínio de simulação (27 x 31 km<sup>2</sup>). Coordenadas U.T.M. (metros)  
(Base cartográfica: Cartas Militares de Portugal do Serviço Cartográfico do Exército. Série M586 (1967),  
Folhas N°5 (Lisboa) e N°6 (Évora), à escala 1:250.000).

A opção de prolongar o domínio de simulação para incluir esta zona de relevo mais acentuado, cerca de 9,5 km para Norte da estação de Mação, resultou da análise dos resultados de corridas preliminares que foram efectuadas com os dois modelos.

O círculo a verde (●) indica a localização da Central do Pego; a localização das estações está assinalada com o símbolo verde claro (★); esta simbologia irá manter-se ao longo do presente documento. As coordenadas indicadas na figura estão expressas em metros e referidas à quadrícula principal decaquilométrica U.T.M., Fuso 29, Elipsóide Internacional, Datum Europeu.



### 4.2.2 Orografia

A orografia da região está ilustrada na Figura 9, onde se representa uma região extensa, que inclui a área de simulação, delimitada pelo rectângulo de cor branca. De acordo com a legenda de cores da figura, as cotas mínimas, inferiores a 50 metros, observam-se junto ao rio Tejo, as mais altas ultrapassam os 600 metros e situam-se a Norte de Mação, dentro do domínio de simulação. A Central do Pego está implantada numa plataforma de cota altimétrica aproximada de 95 metros, inserida num planalto orograficamente pouco acidentado, limitado a Norte pelo vale do rio Tejo.

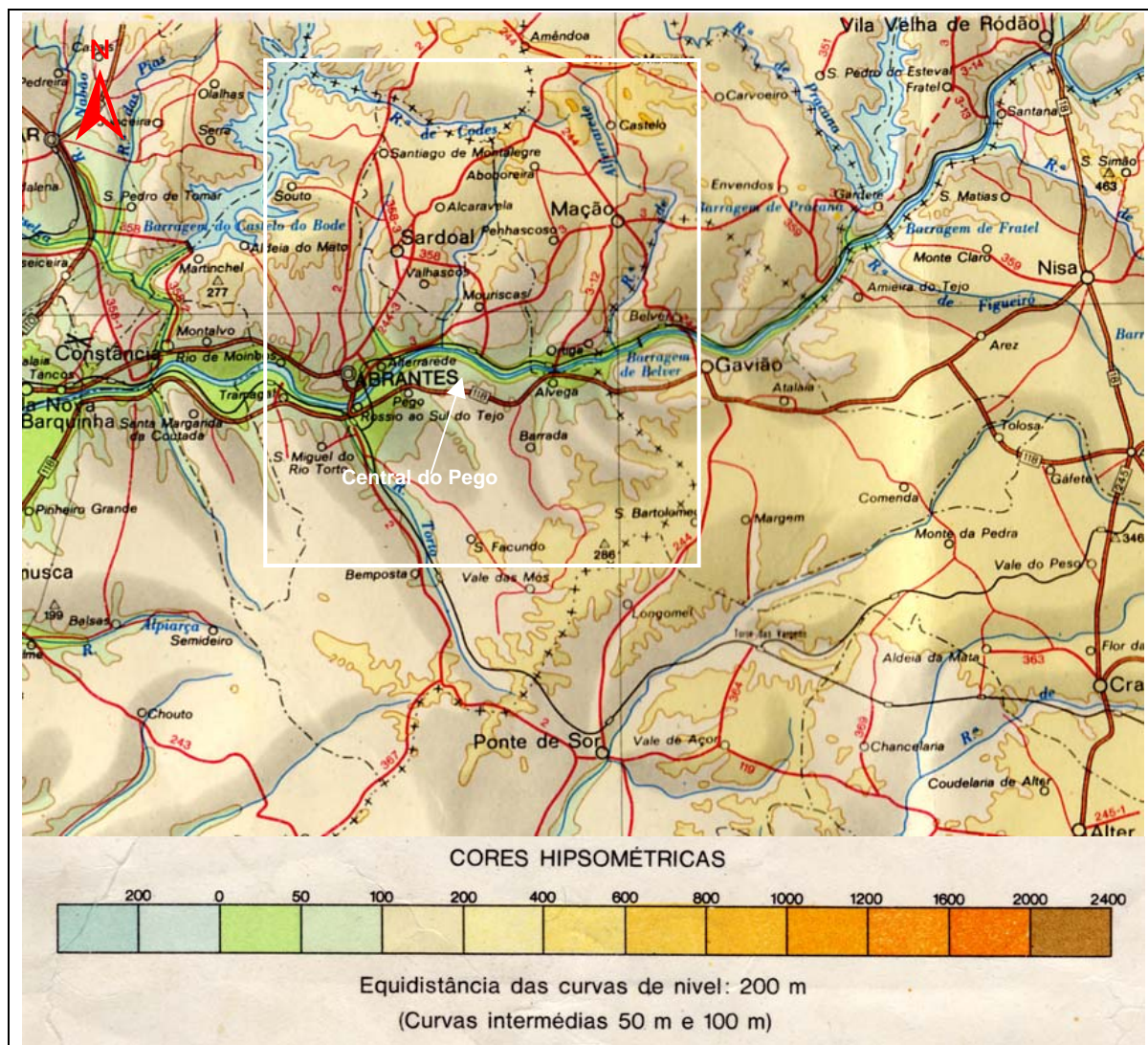


Figura 9- Orografia da região envolvente à Central do Pego e domínio de simulação (área delimitada a branco)

(Fonte: Carta hipsométrica do Instituto Geográfico e Cadastral, de 1974, à escala 1:500.000)

Na Figura 10 está representada a área considerada na aplicação do modelo AERMAP, ligeiramente maior do que o domínio seleccionado para a simulação da qualidade do ar.

4. DESCRIÇÃO DO CASO DE ESTUDO

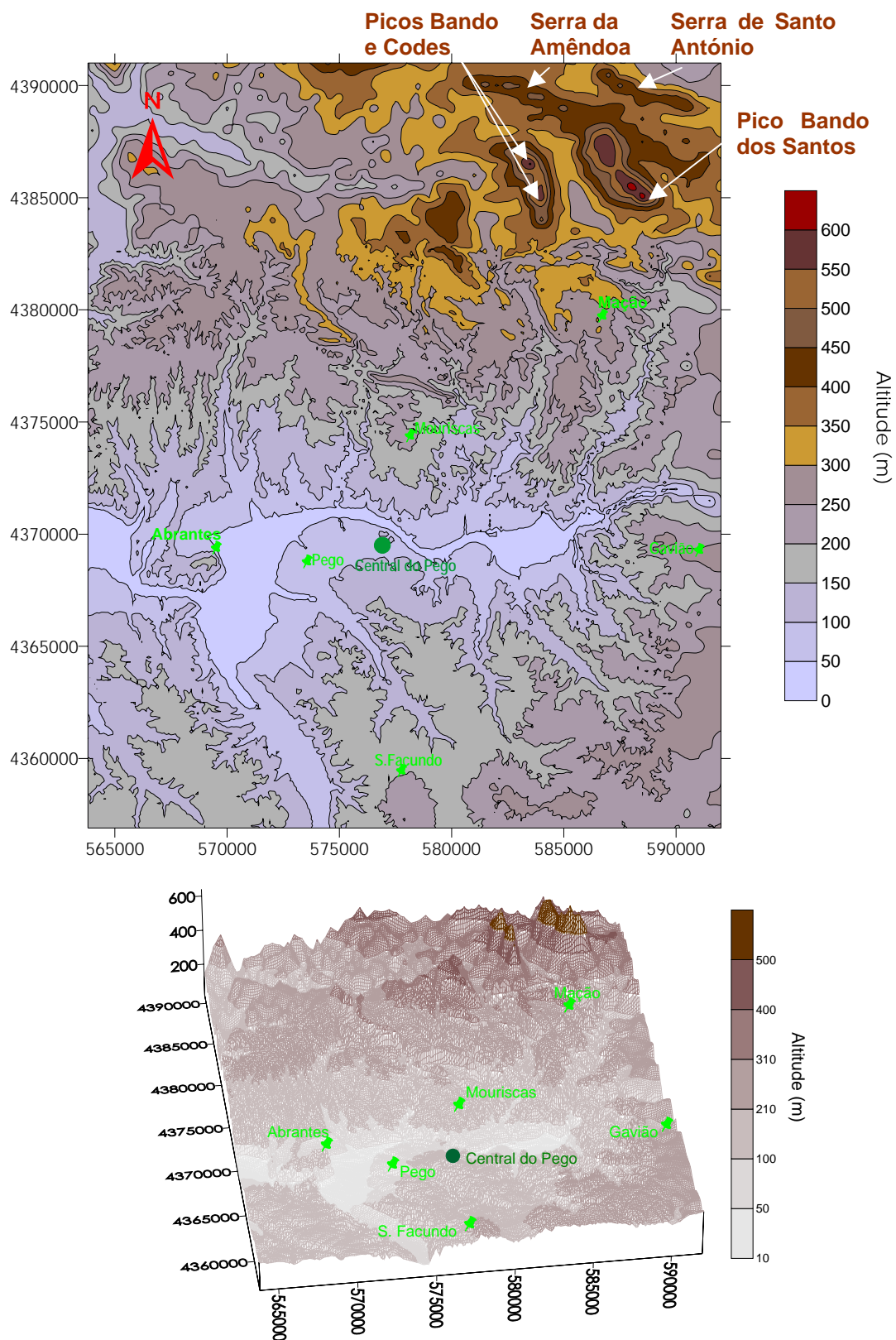


Figura 10 - Orografia da região: domínio de aplicação do modelo AERMAP (altitude e coordenadas U.T.M. expressas em metros).



Nesta figura é visível o vale do rio Tejo, no qual se situa a Central. Neste troço do rio, o vale do Tejo tem uma orientação geral E – W, embora apresente uma inflexão com orientação SE-NW junto à Central e outra NE-SW já próximo de Abrantes. As encostas estendem-se desde as margens do rio, com altitudes inferiores a 50 m, até altitudes da ordem dos 200 a 250 m, sendo ainda visível na figura a zona de relevo mais acidentado referida anteriormente, a N-NE do domínio, que abrange a Serra da Amêndoa e a Serra de Santo António, onde são atingidas cotas da ordem dos 600 m.

A área total abrangida pelos ficheiros de entrada no AERMAP é de  $28,2 \times 34,1 \text{ km}^2$ , com nós de 100 em 100 m. Estes ficheiros foram obtidos a partir do modelo digital do terreno cedido pelo Instituto Geográfico Português ([www.igeo.pt](http://www.igeo.pt)) – que abrange uma área quadrada mais pequena, de  $26,0 \times 26,0 \text{ km}^2$ , com espaçamento uniforme de 25 metros – e por leitura directa de cotas do terreno em cartas topográficas militares, à escala 1:25.000, com espaçamento de 500 metros, permitindo estender o domínio de aplicação do AERMAP para Norte e Este. As curvas de nível representadas na figura anterior foram obtidas com base nesta informação.

Relativamente aos seis receptores discretos, cujas localizações coincidem com as das estações da RMQA, estão indicadas no Quadro 5 as respectivas coordenadas e cotas reais do terreno.

Quadro 5 – Localização das estações da RMQA e dados fornecidos pelo AERMAP para os receptores correspondentes (m)

Receptores/ Estações da RMQA	Coordenadas U.T.M.		Cota real	Cota extraída	Diferença entre a cota real e a cota extraída	Escala de altura, $h_c$	Diferença entre $h_c$ e a cota extraída
	X (→)	Y (↑)					
Abrantes	569425	4368875	197,0	175,8	+21,2	195,0	+19,2
Pego	574150	4368025	93,0	90,8	+2,3	160,0	+69,3
Mouriscas	577950	4373975	206,5	205,9	+0,6	228,0	+22,1
Mação	586475	4379075	312,0	308,1	+3,9	315,0	+6,9
Gavião	591188	4369050	280,0	264,1	+15,9	282,0	+17,9
S. Facundo	577688	4359063	209,0	212,1	-3,1	236,0	+23,9

Neste quadro apresentam-se, ainda, para cada receptor: as cotas extraídas dos ficheiros de altimetria do terreno e as escalas de altura (calculadas pelo modelo AERMAP), as diferenças que se verificam entre as cotas reais e as cotas extraídas e as diferenças entre as escalas de altura e as cotas extraídas. As cotas reais dos locais das estações diferem das cotas estimadas pelo AERMAP, sendo as maiores diferenças verificadas no caso de Abrantes e do Gavião. No caso do Pego, o escoamento é influenciado pelo terreno circundante mais elevado, como se depreende da diferença entre a escala de altura e a cota extraída.

### 4.2.3 Uso do solo

Tal como referido anteriormente, os valores atribuídos aos parâmetros característicos da superfície – albedo, rugosidade superficial e a razão de Bowen – resultaram da análise das características do uso do solo da região e de uma análise de sensibilidade do efeito da sua variação nos valores estimados pelo AERMOD. A análise do uso do solo na envolvente da Central foi feita com base em fotografias aéreas e em cartas militares. A Figura 11 mostra uma montagem de fotografias aéreas (URL 4) abrangendo a zona envolvente da Central do Pego.

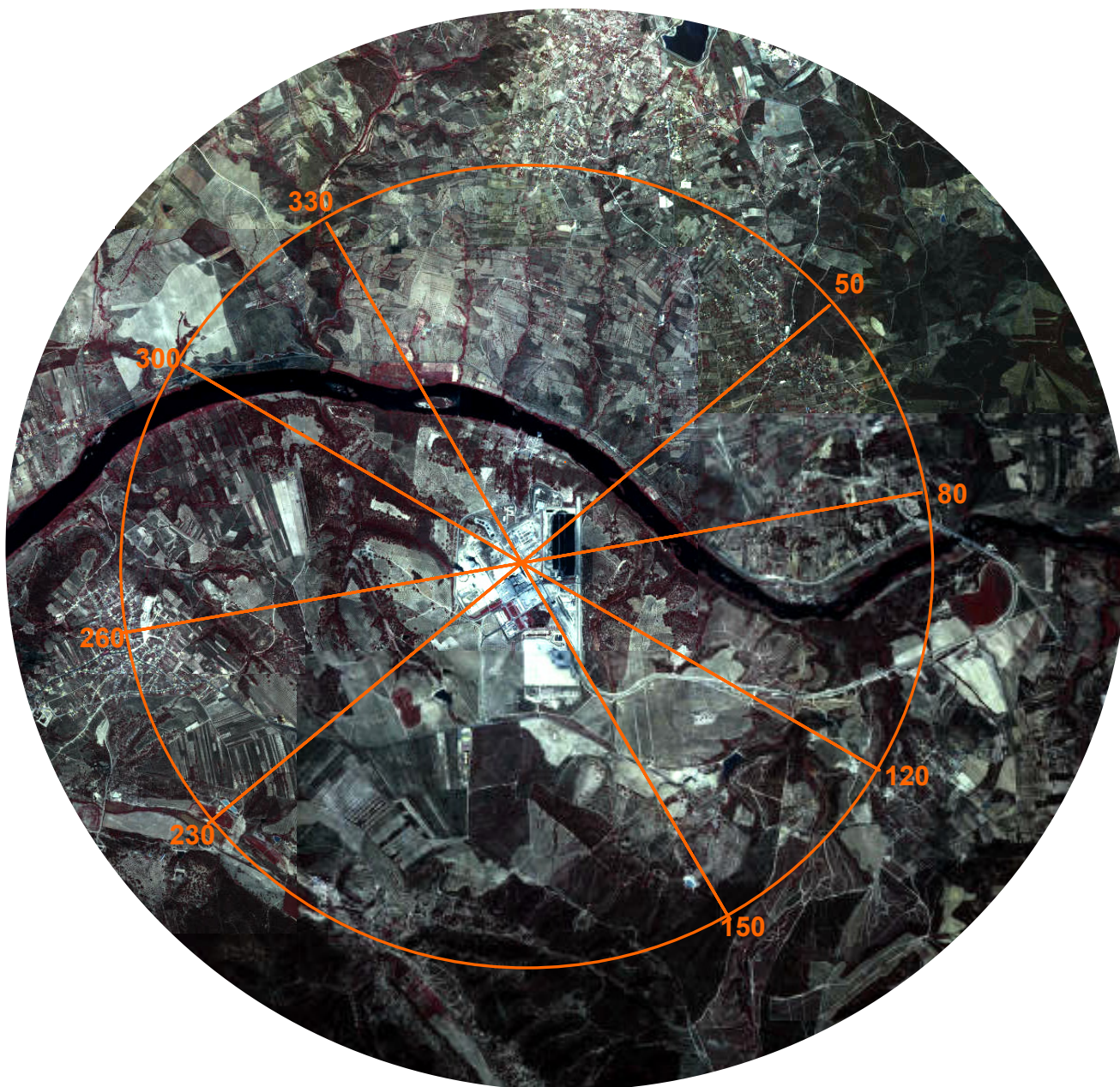


Figura 11 – Uso do solo na envolvente da Central Termoelétrica do Pego. A circunferência laranja delimita uma área de cerca de 3 km de raio.



Para a classificação das características da superfície, foi considerada a área delimitada pela circunferência representada a laranja, com cerca de 3 km de raio, centrada nas chaminés da Central do Pego. A divisão do círculo nos 8 sectores indicados nesta figura serviu de base a algumas simulações feitas, no âmbito da análise de sensibilidade descrita no capítulo 5.

As áreas a vermelho representam zonas mais densamente arborizadas – mais perceptível na Figura 12 (URL 4), que apresenta uma vista aérea da área da Central, onde são bem visíveis as torres de refrigeração, as chaminés e o parque de carvão.



Figura 12 – Central Termoelectrica do Pego: fotografia aérea (escala aproximada: 1:17.000)

Devido à dimensão dos seus edifícios e estruturas (torres de refrigeração - com 110 m de altura e 86 m de diâmetro -, edifícios dos grupos geradores de vapor e do turbo-grupo - com alturas entre 30 e 60 m -, o parque de carvão - com uma altura média das pilhas de carvão de cerca de 15 m e uma área de cerca de 12,5 ha -, os silos de cinzas e torres de transferência de carvão, além de outros edifícios), a Central do Pego pode ser comparada, para efeitos de uso do solo, a uma área urbana.

A área envolvente da Central é caracterizada pela presença do rio Tejo, a Norte, e por várias ribeiras afluentes, com arvoredo denso junto às margens. Existem áreas extensas de espaço agro-florestal, pouco densas, em que predominam espécies de folha persistente, normalmente oliveiras e sobreiros. A Este, a Sul e a Norte da Central junto ao rio, encontram-se alguns espaços agrícolas. A Nordeste, junto ao limite da área circular de 3 km de raio, começa uma mancha extensa de floresta de eucalipto e pinheiro, que se estende até à região de Mação. Parte dos núcleos urbanos do Pego e das Mouriscas está englobada no círculo.

Com o objectivo de determinar os parâmetros superficiais, tendo em conta o uso do solo na envolvente da Central, o círculo de 3 km de raio foi dividido em 12 sectores de 30° e cada um dos sectores em quatro secções. Foram identificados os tipos de cobertura do solo em cada secção. Estes usos foram agrupados em: áreas arborizadas pouco densas (olival) e relativamente densas (sobreiros, azinheiras, pinheiros ou eucaliptos), a Central (ocupando uma extensão considerável, com edifícios muito altos e áreas pavimentadas), áreas urbanas (Pego e Mouriscas, aglomerados de baixa densidade, com casas de habitação de tipo unifamiliar, em geral de um só piso), áreas cultivadas e o rio Tejo.

Para cada tipo de cobertura foram atribuídos valores sazonais a cada um dos três parâmetros, tendo por base os valores tabelados no Manual do AERMET [Paumier e Brode, 1999; U.S. EPA, 2002a]. Foi calculado um valor médio ponderado por sector, considerando a área de cada secção. Os valores obtidos por secção e por estação do ano foram introduzidos directamente no AERMET Pro. A Figura 13 exemplifica o procedimento seguido; os valores a azul são valores médios para cada sector, para uma estação do ano e um parâmetro (naquele caso a rugosidade).

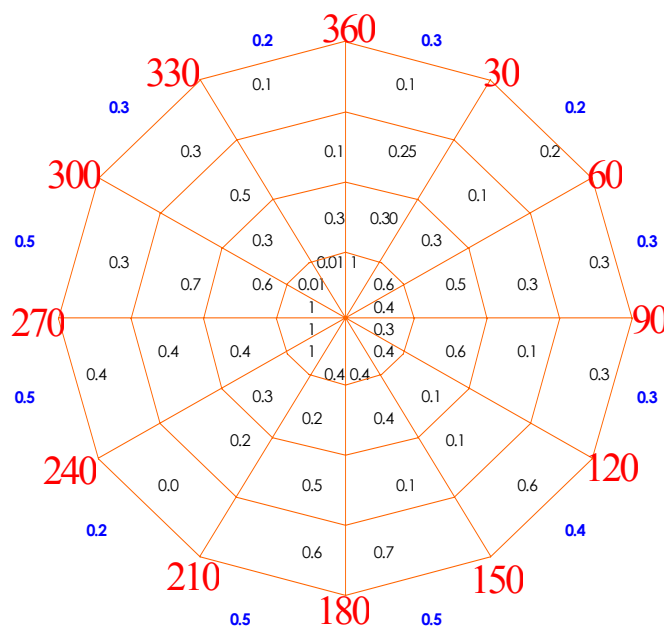


Figura 13 – Procedimento de selecção dos parâmetros superficiais em função do uso do solo (exemplo: rugosidade)

Os valores máximos, mínimos e médios da série de valores atribuídos às diferentes secções e estações do ano, por parâmetro, estão indicados no Quadro 6; é também incluído, neste quadro, o intervalo de variação dos parâmetros para diferentes tipos de cobertura do solo, considerados no Manual do AERMET [Paumier e Brode, 1999; U.S. EPA, 2002a].

Quadro 6 – Valores mínimos e máximos dos parâmetros albedo, razão de Bowen e rugosidade, calculados para a área envolvente da Central

	Albedo, $r'$	Razão de Bowen, $\beta_o$	Rugosidade, $z_0$ (m)
Mínimo – máximo	0,12 – 0,19	0,3 – 1,1	0,17 – 0,57
Médio	0,13	0,7	0,35
Intervalo possível de valores	0,1 – 0,6 (0,1 - floresta folha caduca; 0,6 - terrenos cultivados)	0,1 – 10 (0,1 - água; 10 - deserto)	0,0001 – 1,3 (0,0001 - águas paradas; 1,3 - floresta)

Na escolha dos valores a atribuir, constatou-se que as categorias de usos de solo definidas no Manual do AERMET são demasiado genéricas e limitadas em tipos (água, floresta de árvores de folha caduca, floresta de coníferas, áreas pantanosas, terreno cultivado, herbáceas, uso urbano e vegetação desértica), sendo difícil enquadrar alguns dos usos encontrados no Pego: as áreas de olival e sobral, a própria Central e os núcleos urbanos de baixa densidade. Em termos de variação sazonal dos parâmetros, os valores especificados para o Inverno não são aplicáveis a Portugal, porque se referem a superfícies cobertas de neve e temperaturas inferiores ao ponto de congelação.

#### 4.2.4 Meteorologia

A Central do Pego tem uma estação meteorológica instalada junto à sua plataforma, à cota de 110 metros. Esta estação meteorológica inclui uma torre com sensores montados a três níveis:

- 2 metros de altura: temperatura do ar, humidade relativa do ar e velocidade do vento;
- 10 metros: velocidade e direcção do vento, temperatura do ar e humidade relativa do ar;
- 30 metros: velocidade e direcção do vento, temperatura do ar.

É ainda medida a precipitação.

Além desta estação meteorológica principal, todas as estações de qualidade do ar da RMQA, à excepção de Abrantes, têm um mastro meteorológico instalado, equipado com sensores de direcção e velocidade do vento, localizados a 10 metros de altura, e de temperatura do ar.

As simulações realizadas com os modelos de qualidade do ar basearam-se em dados meteorológicos de 2003. Os dados de temperatura, velocidade e direcção do vento e de precipitação foram medidos na estação meteorológica da Central; pontualmente, as séries de temperatura e de vento foram completadas com dados obtidos nas estações da RMQA ou na estação de Alvega (Instituto de Meteorologia, IM). A informação sobre nebulosidade tem origem nas estações de Tancos e de Castelo Branco, ambas do IM, para o ano de 2003, e nas normais

climatológicas referentes à estação climatológica de Alvega, para um período de 30 anos, compreendido entre 1961 e 1990.

A preparação do ficheiro de entrada no AERMET Pro foi precedida de um pré-tratamento dos dados meteorológicos, com o objectivo de completar as séries de dados e de as formatar de acordo com os requisitos do pré-processador, em termos de alteração dos códigos de invalidação usados, atribuição do formato ADMS, etc..

Existem algumas diferenças de formato entre os ficheiros produzidos pelo AERMET Pro e pelo AERMET da U.S. EPA. Assim, foi necessário tornar compatível o formato dos ficheiros de saída com o requerido pelo AERMOD da U.S. EPA.

#### **4.2.4.1.1 Temperatura, vento e precipitação**

A aplicação dos modelos teve por base os dados meteorológicos de temperatura e vento da estação meteorológica da Central, obtidos a uma altura de 10 metros. Estas séries encontravam-se bastante completas, faltando apenas cerca de 2% dos valores anuais de cada parâmetro. A maioria dos dados em falta não foi substituída, por coincidirem com períodos sem emissão, para os quais não são feitos cálculos de dispersão, ou por se tratar de sequências de dados em falta relativamente longas.

Para os valores em falta, o preenchimento de lacunas de dados, quer de temperatura e de vento da estação principal, quer de vento das estações da RMQA (para gerar rosas de poluição), seguiu de perto os métodos recomendados pela U.S. EPA, tendo sido aplicado maioritariamente a valores isolados, normalmente por interpolação, considerando as 4 horas que rodeiam a hora em falta; o valor médio da direcção do vento foi obtido usando a aproximação do vector unitário [U.S. EPA, 2000; Atkinson e Lee, 1992]. Esporadicamente, foram completadas séries curtas, com valores retirados, para as mesmas horas, de uma das séries das estações de qualidade do ar, ou de Alvega (IM), se apresentasse uma sequência de valores muito semelhante à da Central nos períodos que antecedem e seguem os dados em falta.

Os dados meteorológicos da Central do Pego foram fornecidos sob a forma de ficheiros mensais de valores médios semi-horários. A versão do pré-processador Aermet Pro que foi usada não processa dados meteorológicos de média temporal inferior a uma hora (ao contrário da última versão do Aermet da U.S. EPA, que possui essa capacidade). A informação mensal foi compilada num só ficheiro anual e foram calculados valores médios horários a partir dos semi-horários, sempre que existissem dois valores válidos por hora. No caso da direcção do vento, as médias horárias foram calculadas com base no método de Mitsuta, para ter em conta a passagem 0-360° [U.S. EPA, 2000].

Os anemómetros instalados na Central do Pego e nas estações da RMQA têm um limite inferior de detecção de  $0,3 \text{ m.s}^{-1}$ . O AERMET da U.S. EPA permite definir qual o valor correspondente ao limiar do equipamento, abaixo do qual os ventos devem ser tratados como calmas; o

AERMET Pro, no entanto, ao usar dados do tipo ADMS, estabelece como limiar mínimo de velocidade do vento o valor de  $0,4 \text{ m.s}^{-1}$ . É de salientar que ventos de intensidade inferior a  $1 \text{ m.s}^{-1}$  ( $3,6 \text{ km.h}^{-1}$ ) são processados pelo modelo ISCST3 como calmas. A série da estação meteorológica da Central inclui 1 só valor médio horário inferior ao limite do AERMET Pro ( $0,4 \text{ m.s}^{-1}$ ) e 79 horas com valores de velocidade do vento inferiores a  $1 \text{ m.s}^{-1}$ .

#### **4.2.4.1.2 Nebulosidade**

Na Central do Pego não é medida a nebulosidade. Na estação do IM de Alvega existem dados para o período 1961-1990, mas recentemente esta estação deixou de medir nebulosidade, não existindo informação pelo menos para os últimos cinco anos.

Foi estimada uma série horária de nebulosidade para 2003, tendo em conta os registos de precipitação da Central do Pego, os registos de nebulosidade da estação de Tancos e da estação de Castelo Branco e os valores médios de nebulosidade constantes das Normais Climatológicas para a estação de Alvega e para o período 1961-1990. Foram usados preferencialmente os registos da estação de Tancos, por se tratar da estação mais próxima. Na obtenção do ficheiro horário de nebulosidade foram considerados os seguintes critérios, prevalecendo os primeiros relativamente aos seguintes, de acordo com a ordenação indicada:

- Critério 1: nas horas com ocorrência de precipitação, tendo por base os registos de precipitação da Central do Pego, considerou-se nebulosidade correspondente a 8 oitavos;
- Critério 2: foram usados os registos de nebulosidade da estação de Tancos da hora em causa ou, não estando esta disponível, da hora imediatamente anterior ou seguinte;
- Critério 3: para as restantes horas sem registos próximos de Tancos, existindo registos de nebulosidade na estação de Castelo Branco, foi calculado o valor médio entre o valor medido ou estimado para a hora anterior e o valor registado nessa hora em Castelo Branco;
- Critério 4: não existindo registos para Castelo Branco, consideraram-se os valores das normais climatológicas referentes à estação climatológica de Alvega (período de 30 anos, entre 1961 e 1990), tendo sido estimados valores horários em função da hora do dia e do mês em causa.

O peso de cada um destes critérios na série de nebulosidade obtida resume-se no quadro seguinte. Cerca de 50% dos dados foram obtidos a partir da série de Castelo Branco.

Quadro 7 – Origem dos dados de nebulosidade

Critério	Informação de base	%do total de horas de 2003
Critério 1	Precipitação	8%
Critério 2	Estação de Tancos (IM)	22%
Critério 3	Média hora anterior / estação de Castelo Branco (IM)	51%
Critério 4	Média hora anterior / Normais Climatológicas	19%

#### 4.2.4.1.3 Caracterização meteorológica

A frequência de ocorrência de nebulosidade na região do Pego, em 2003, tal como estimada pelo procedimento descrito anteriormente, apresenta-se na Figura 14, expressa em termos de oitavos (0 representa céu limpo, sem nuvens e 8 céu totalmente encoberto). Na mesma figura os valores estimados comparam-se com as observações feitas em Castelo Branco, no mesmo ano.

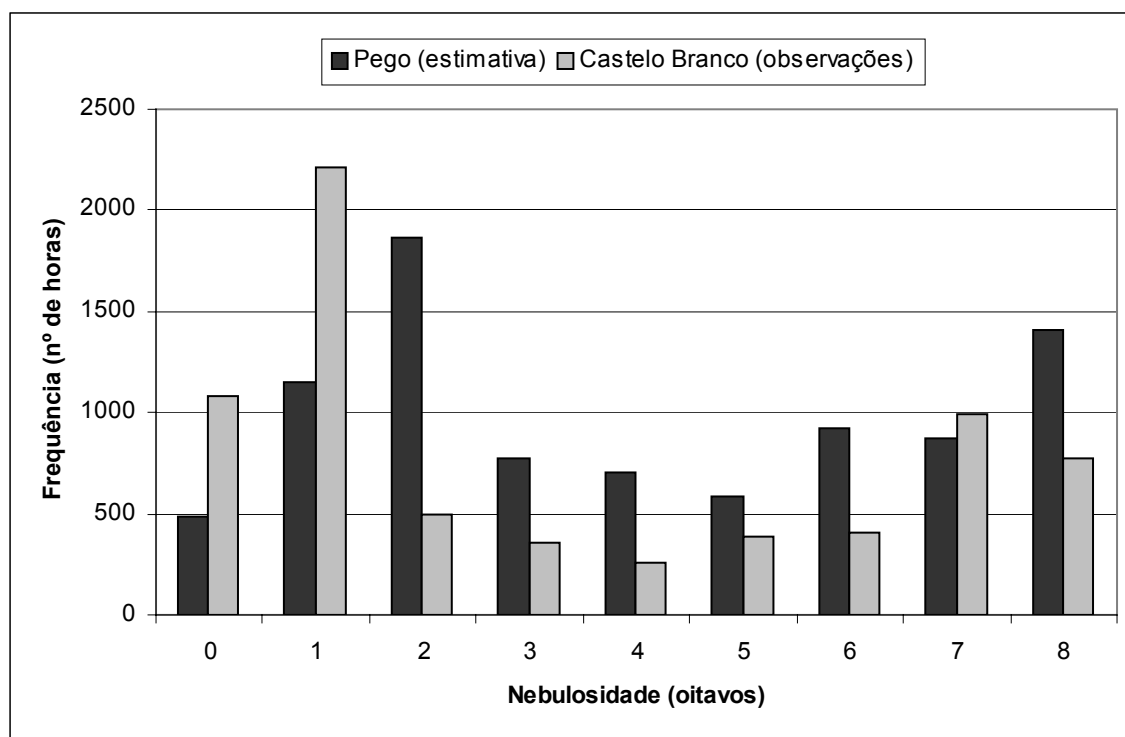


Figura 14 – Comparação dos valores de nebulosidade (oitavos) estimados para a região de estudo e observados em Castelo Branco

De acordo com os valores estimados, a frequência de horas no ano com nebulosidade maior ou igual a 2 oitavos é, em geral, maior no Pego de que em Castelo Branco. Em Castelo Branco são frequentes as horas com céu limpo ou pouco nublado (nebulosidade 0-1 oitavo).

Tendo por objectivo a comparação do ano meteorológico de 2003 com séries mais longas representativas do clima desta região, é feita, em seguida, uma caracterização breve da temperatura e regime de ventos, recorrendo-se, para tal, à informação obtida na estação climatológica de Alvega, pertencente à rede nacional de estações do Instituto de Meteorologia



(IM). Esta estação foi considerada a mais representativa da região da Central do Pego, em virtude da sua proximidade e exposição fisiográfica semelhante. A estação de Alvega situa-se, também, na margem esquerda do Tejo, à latitude de 39°28'N e longitude de 8°03'W, e a uma altitude de 51 m, ligeiramente inferior à da Central. Os registos referidos dizem respeito ao período 1961-1990.

Genericamente, o clima da região é do tipo temperado (temperatura média anual de 15,5°C), moderado (amplitude da variação média anual da temperatura do ar de 14,4°C), húmido (valor médio no ano da humidade relativa do ar às 9h de 79%) e moderadamente chuvoso (quantidade de precipitação média no ano de 678 mm).

A velocidade média do vento verificada no período 1961-1990 foi de 1,6 m.s<sup>-1</sup>. A frequência anual de calmas (velocidade do vento inferior a 0,3 m.s<sup>-1</sup>) é de cerca de 18%, sendo maior nos meses de Outubro a Fevereiro (superior a 25%). A frequência anual de ocorrência de ventos para oito rumos é apresentada na Figura 15 (série representada a rosa).

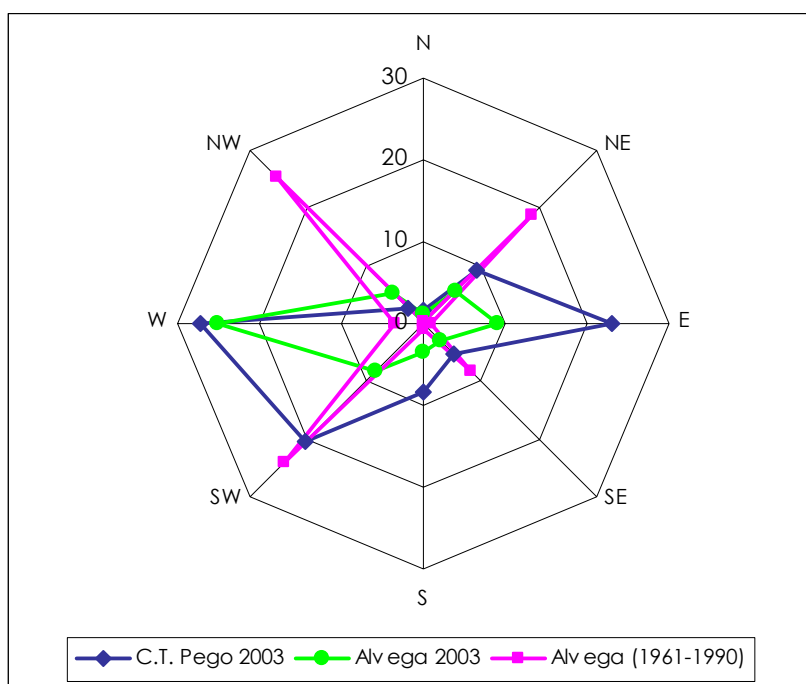


Figura 15 – Frequência do rumo do vento (%): comparação das séries de 2003 da Central do Pego e de Alvega com as normais 1961-1990 de Alvega.

Comparativamente com a série longa 1961-1990, em 2003 registaram-se os seguintes valores na Central do Pego e em Alvega:

- Temperatura média: 16,6°C na Central do Pego e 16,5°C em Alvega;
- Velocidade média do vento: 3,2 m.s<sup>-1</sup> na Central e 1,7 m.s<sup>-1</sup> em Alvega;
- Direcção do vento: as frequências do vento para 8 rumos estão representadas na Figura 15, a azul (Central) e a verde (Alvega). A percentagem de calmas é praticamente nula na Central e muito alta em Alvega, cerca de 39%. A série de Alvega é relativamente incompleta, faltando aproximadamente 14% de dados do ano.

Salienta-se que o regime de ventos observado no local da Central, em 2003, foi significativamente diferente do observado em Alvega no período 1961-1990, com maior incidência de ventos de Oeste e de Este e menor incidência de NW e NE, uma percentagem de calmas muito inferior e uma velocidade média do vento mais alta. Verificam-se, também, diferenças significativas entre a distribuição observada em 2003 em Alvega e as normais 1961-1990 do mesmo local, nomeadamente uma maior predominância de ventos de Oeste, semelhante ao que acontece com a série da Central, e também de Este, e menor frequência de NW, NE e SW. As diferenças observadas podem ser explicadas devido ao facto de os instrumentos usados nas duas séries de Alvega serem diferentes. Os dados de 2003 obtidos nas estações de Alvega, como a série da Central, resultam de medições contínuas por métodos automáticos. No entanto, as três rosas de vento são coincidentes quanto ao facto de praticamente não ocorrerem ventos de Norte.

Observam-se, também, algumas diferenças entre as duas séries de 2003 (Central do Pego e Alvega): a percentagem de ventos de SW e de E é bastante menor em Alvega do que na Central do Pego. É de salientar a percentagem muito alta de calmas verificada em Alvega em 2003, que contrasta com a percentagem quase nula verificada na Central. Esta diferença poderá estar relacionada com deficiências no funcionamento dos sensores ou no pós-processamento dos sinais.

Na Figura 16 comparam-se as rosas de vento anuais obtidas em cinco das seis estações da RMQA (na estação de Abrantes não existem sensores meteorológicos instalados) com a rosa de ventos obtida na Central, a 10 m de altura. As escalas usadas nos gráficos diferem de gráfico para gráfico.

4. DESCRIÇÃO DO CASO DE ESTUDO

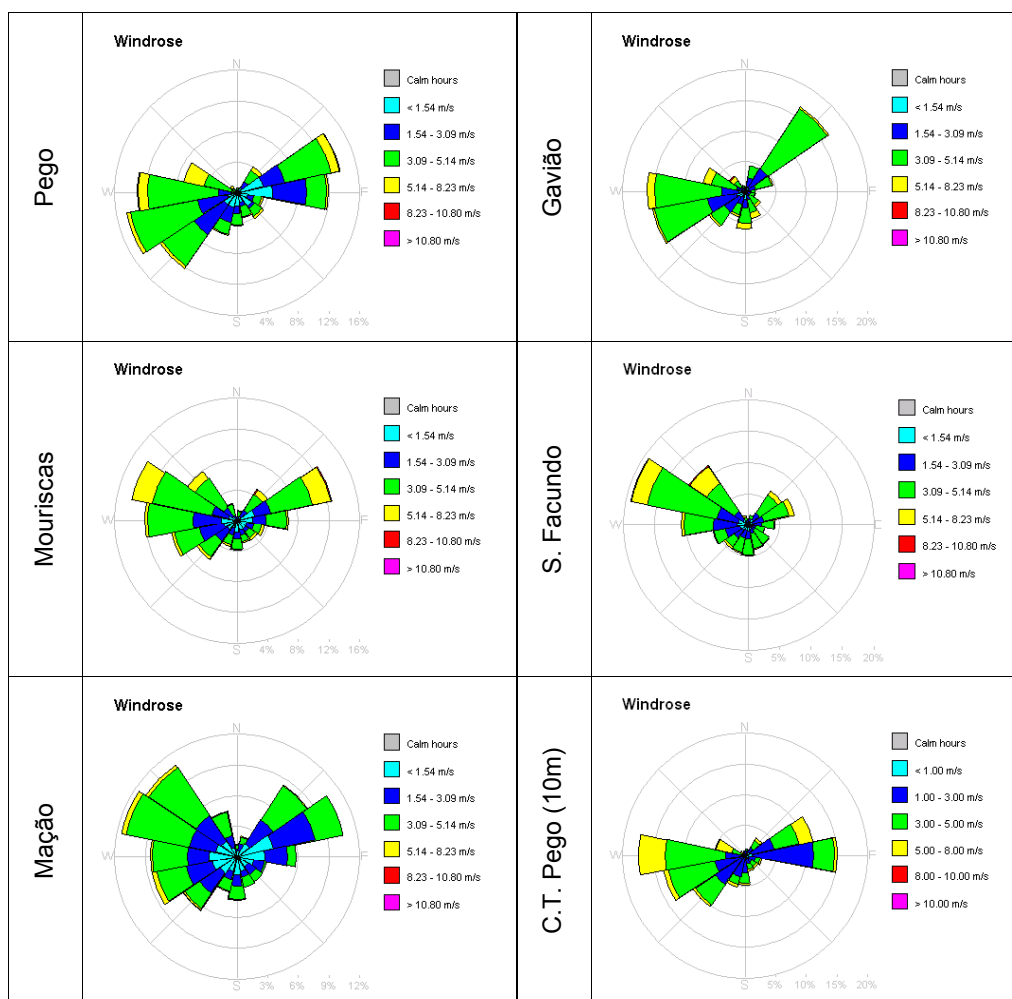


Figura 16 – Rosas de ventos anuais das estações da RMQA e da Central do Pego

Observam-se diferenças significativas em todas as estações, particularmente nas mais distantes: Gavião, com uma componente importante de Nordeste, S. Facundo, com ventos de Noroeste dominantes, e Mação, com uma percentagem de calmas importante e ventos de baixa intensidade. Salienta-se que a estação de Mação se situa dentro da área vedada de uma escola, estando parcialmente rodeada de edifícios, sendo possível, por isso, que a velocidade e direcção do vento medidas nesta estação não sejam representativas de uma área envolvente extensa.

Esta análise evidencia o facto de o campo de ventos na região não ser homogéneo; assim, os dados medidos no mastro meteorológico da Central do Pego não podem ser considerados representativos de toda a área de estudo. Este aspecto será tido em conta na interpretação dos resultados dos modelos.

Na Figura 17 apresentam-se as rosas de vento, anual e por estação do ano, relativas à série de 2003 da Central do Pego.

4. DESCRIÇÃO DO CASO DE ESTUDO

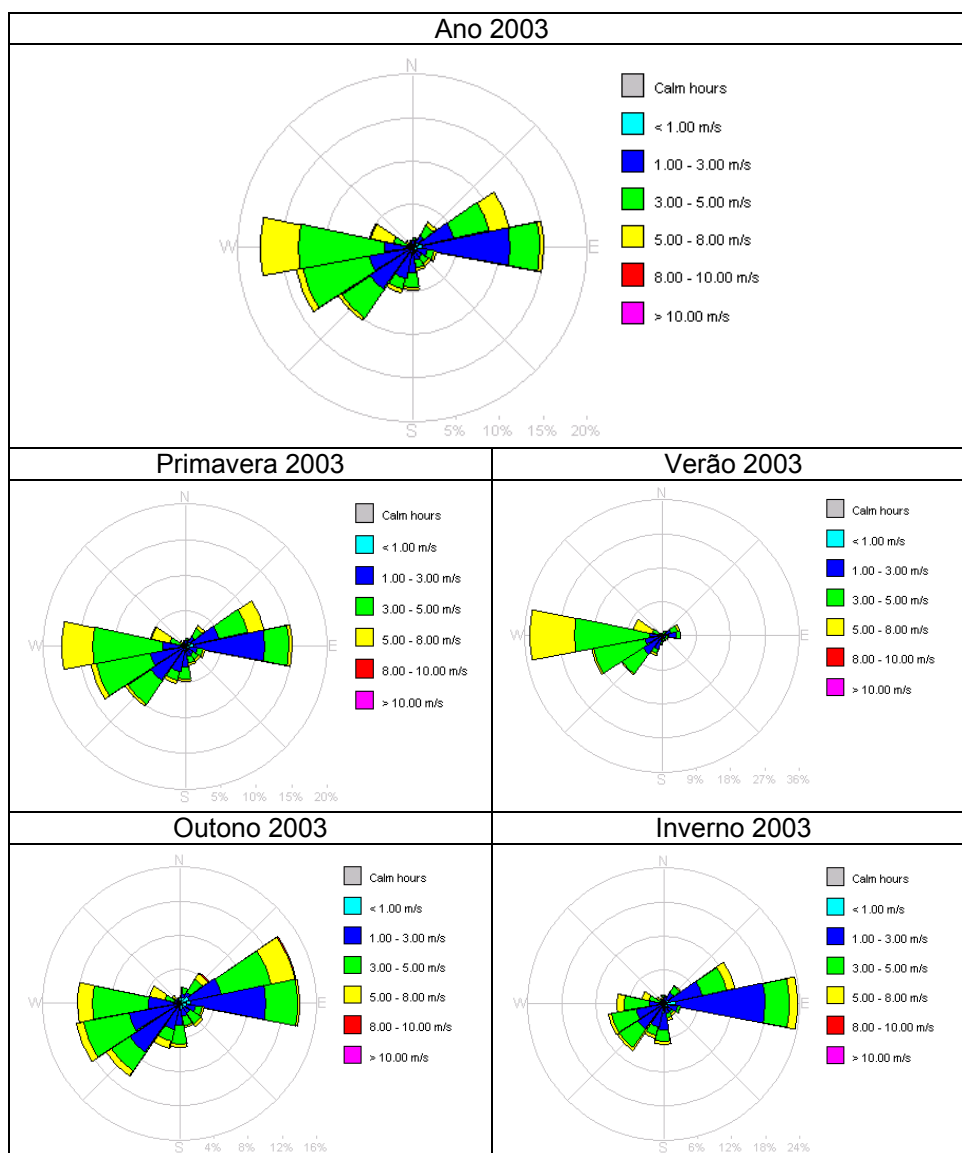


Figura 17 – Rosa de ventos anual e por estação do ano, relativas a 2003, para a estação meteorológica principal da Central do Pego (sensores instalados a 10 metros).

Como se observa nesta figura, existem variações sazonais muito marcadas no regime de ventos; no Verão, a predominância de ventos de Oeste poderá ser explicada pela penetração da brisa marítima, atendendo à distância do Pego em relação ao mar e ao facto de 2003 ter sido um ano excepcionalmente quente. No Inverno, os ventos de Este são dominantes.

Por aplicação do método de estimativa das classes de estabilidade de Pasquill-Gifford descrito em 3.3.5.1, considerando um valor médio de rugosidade de 0,5 metros, obteve-se uma série horária de valores em que predominam as classes D e F, como se conclui da análise da Figura 18, onde se representa a frequência anual de ocorrência das seis classes de estabilidade.

4. DESCRIÇÃO DO CASO DE ESTUDO

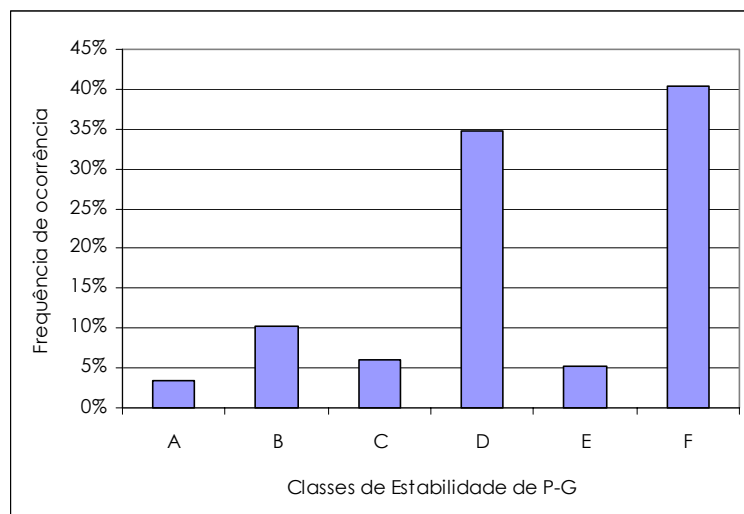


Figura 18 – Frequência anual de ocorrência das classes de estabilidade Pasquill-Gifford (%)

É de salientar a predominância da classe F, com uma frequência anual de aproximadamente 40%.

A Figura 19 mostra a evolução da estabilidade ao longo do dia, tal como estimada pelo método referido. Durante todo o período diurno a classe D (neutra) é a classe predominante, sendo a classe B igualmente frequente próximo do meio-dia; durante a noite a classe F é a mais frequente.

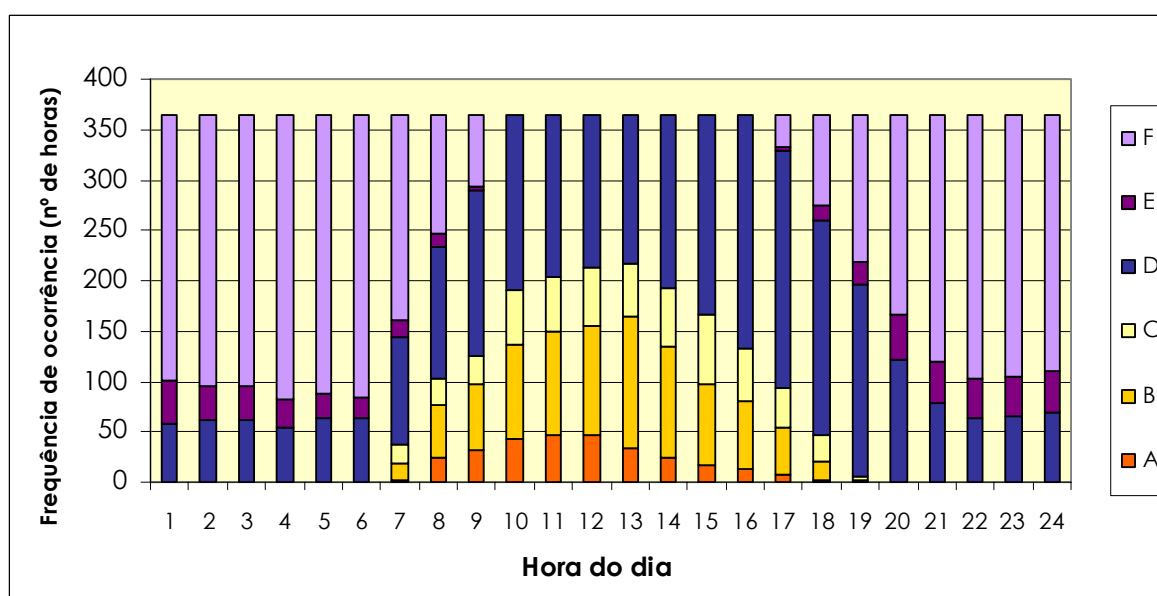


Figura 19 – Frequência anual de ocorrência das classes de estabilidade de Pasquill-Gifford ao longo do dia

Procurando verificar a distribuição de classes estimada, comparam-se as frequências obtidas na Figura 18, com as frequências das classes de estabilidade de Pasquill-Turner apresentadas na Figura 20, obtidas no âmbito de um estudo realizado pelo Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica para a EDP [Electricidade de Portugal, 1988], tendo em vista caracterizar a estrutura térmica e o regime de ventos na região do Pego.

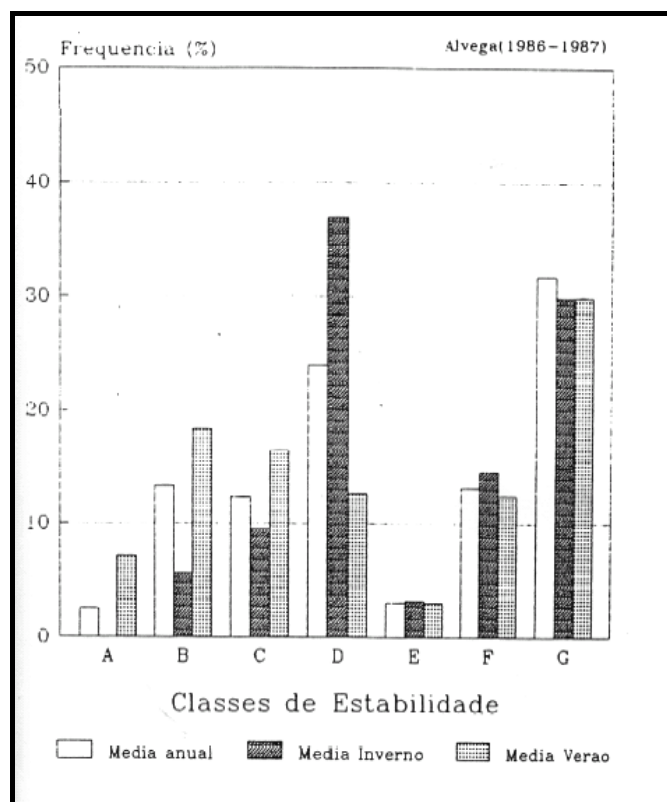


Figura 20 – Frequência de classes de estabilidade de Pasquill-Turner em Alvega (1986-1987) – Média anual, de Inverno e de Verão

A classificação de Turner inclui uma sétima classe de estabilidade, a classe G, correspondente a condições atmosféricas muito estáveis. A figura mostra a dominância, à escala anual, das condições estáveis – considerando a soma das classes F e G –, seguidas das condições de estabilidade neutra (D). De acordo com o mesmo estudo, a classe D tem maior expressão no período diurno e a G é dominante à noite. A contribuição das classes B e C é relativa, apenas, aos períodos diurnos. Estes resultados estão de acordo, de uma forma geral, com as frequências representadas na Figura 18 e na Figura 19.

### 4.3 Caracterização da Qualidade do Ar

A Central Termoelétrica do Pego tem afectada a si uma Rede de Monitorização da Qualidade do Ar (RMQA), para avaliação da qualidade do ar na área envolvente. Esta rede permite vigiar e controlar, em tempo real, os valores das concentrações no ar dos principais poluentes atmosféricos emitidos pela Central.

A rede de monitorização integra seis estações de qualidade do ar e uma estação meteorológica. As seis estações de qualidade do ar localizam-se em: Abrantes, Pego, Mouriscas, Mação, Gavião e S. Facundo (ver Figura 8).

A estação de Abrantes, localizada no interior do Castelo desta cidade, situa-se num espaço elevado e amplo, em linha de vista com a Central do Pego. Relativamente próximo, a nascente, na

freguesia de Alferrarede, encontra-se a Zona Industrial de Alferrarede, onde estão instaladas algumas unidades industriais (reciclagem de sucatas, tratamento de resíduos sólidos, metalurgia, etc.).

A estação de Mouriscas situa-se numa zona de características rurais, também em linha de vista directa da Central, sem outras fontes de emissão na envolvente.

A estação de Mação situa-se no limite do seu núcleo urbano, num ponto alto. Está implantada no interior da vedação de uma escola secundária, rodeada de edifícios (da própria escola e de casas de habitação). A Central do Pego é visível da estação.

A estação do Gavião está situada em área urbana, no limite Oeste da povoação; a Central não é visível da estação. Próximo existe uma pequena zona industrial, que inclui uma unidade industrial do sector da cortiça (fabrico de rolhas).

A zona envolvente da estação de S. Facundo tem características marcadamente rurais, estando situada numa zona relativamente ampla, rodeada por sobreiros e olival pouco denso, sem outras fontes de emissão na proximidade; desta estação avista-se a Central do Pego.

A estação do Pego é a mais próxima da Central, com linha de vista directa para esta, encontrando-se no limite da povoação, numa área ampla. Existe uma unidade industrial entre a estação e a Central.

As estações da RMQA referidas estão equipadas com instrumentação automática de funcionamento em contínuo, para medição das concentrações de SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, NO e partículas e ainda, na estação do Pego, ozono. No caso das partículas, foram substituídos, recentemente, os amostradores de partículas totais em suspensão (PTS) existentes por amostradores PM<sub>10</sub><sup>1</sup>. Presentemente todas as estações de monitorização de qualidade do ar estão equipadas com este tipo de amostradores. O Quadro 8 inclui informação sobre a localização e os poluentes monitorizados em cada estação.

---

<sup>1</sup> PM<sub>10</sub> – partículas em suspensão susceptíveis de passar através de um filtro selectivo com 50% de eficiência para um diâmetro aerodinâmico de 10 µm.

4. DESCRIÇÃO DO CASO DE ESTUDO

Quadro 8 – Estações de monitorização da RMQA da Central do Pego: orientação e distância à Central do Pego, altitude do local (z) e analisadores instalados

Estação	Orientação*	Distância (km)	Coordenadas de localização U.T.M.		Z (m)	Analisadores			
						SO <sub>2</sub>	PM <sub>10</sub>	NO <sub>x</sub>	O <sub>3</sub>
1 – Abrantes	W	8	569425	4368875	197	✓	✓	✓	—
2 – Pego	W	4	574150	4368025	93	✓	✓	✓	✓
3 – Mouriscas	N	5	577950	4373975	207	✓	✓	✓	—
4 – Mação	NE	14	586475	4379075	312	✓	✓	✓	—
5 – Gavião	E	14	591188	4369050	280	✓	✓	✓	—
6 – S. Facundo	S	10	577688	4359063	209	✓	✓	✓	—

\*Orientação relativamente à Central Termoelétrica do Pego

No Quadro 9 encontram-se sumariados os métodos utilizados para a medição dos poluentes atmosféricos mencionados.

Quadro 9 – Características dos equipamentos da RMQA de medição de poluentes atmosféricos

Poluentes	Método de análise	Periodicidade	Mínimo detectável
SO <sub>2</sub>	Fluorescência pulsada	Contínuo	1 ppb
NO <sub>x</sub>	Quimiluminescência	Contínuo	2 ppb
Partículas	Absorção de raios $\beta$	Contínuo	1 $\mu\text{g.m}^{-3}$
O <sub>3</sub>	Absorção UV	Contínuo	1 ppb

Com o objectivo de caracterizar a qualidade do ar na região no que se refere ao poluente abordado nesta dissertação, SO<sub>2</sub>, apresenta-se, no Quadro 10, uma comparação entre os dados de qualidade do ar, medidos nas estações da RMQA entre 1999 e 2003, e os valores limite definidos na legislação em vigor (Decreto-Lei 111/2002, de 16 de Abril).



4. DESCRIÇÃO DO CASO DE ESTUDO

Quadro 10 – Níveis de SO<sub>2</sub> registados nas estações de qualidade do ar de 1999 a 2003 e comparação com o Decreto-Lei 111/2002.

	Decreto-Lei 111/2002 de 16 de Abril														
	Nº de vezes em que é excedido o valor limite horário para protecção da saúde humana (350 µg.m <sup>-3</sup> )					Nº de vezes em que é excedido o valor limite diário para protecção da saúde humana (125 µg.m <sup>-3</sup> )					Valor limite anual para protecção dos ecossistemas (20 µg.m <sup>-3</sup> )				
Nº máximo de ultrapassagens por ano	24					3					-				
Ano	1999	2000	2001	2002	2003	1999	2000	2001	2002	2003	1999	2000	2001	2002	2003
Abrantes	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16	14	13	15	14
Gavião	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	14	15	17	9
Mação	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	8	8	12	9
Mouriscas	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17	10	17	19	14
S. Facundo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11	11	15	18	13
Pego	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	16	12	11	10	9

Constata-se que os valores de SO<sub>2</sub> medidos são, em todas as estações e no período referido, inferiores aos respectivos valores limite (sem considerar a margem de tolerância associada ao valor limite horário).

O Quadro 11 resume os principais parâmetros estatísticos para as médias horárias e as taxas de recolha de dados, ou eficiência, das estações, relativos ao ano 2003.

Quadro 11 – Principais parâmetros estatísticos das séries horárias de concentrações de SO<sub>2</sub> medidas nas estações da RMQA, em 2003

Valores horários	Abrantes	Pego	Mouriscas	Mação	Gavião	S Facundo
Valor médio	14	9	14	9	9	13
Mediana	12	8	13	6	7	12
Valor máximo	143	113	121	161	92	90
Percentil 98	35	21	33	27	22	25
Valores superiores a 350	0	0	0	0	0	0
Lacunas	1347	850	1231	907	698	430
Eficiência*	85	90	86	90	92	95

\*Calculada com base em médias horárias, sendo inferior à da série original de valores médios semi-horários.

Em termos de valores médios anuais, as concentrações mais altas, compreendidas entre 13 e 14 µm<sup>-3</sup>, verificaram-se nas estações de Abrantes, S. Facundo e Mouriscas; nas estações de Pego, Gavião e Mação as médias anuais são próximas de 9 µm<sup>-3</sup>. Os valores máximos variam

entre 90 e 161  $\mu\text{g.m}^{-3}$ , tendo o máximo mais alto sido registado em Mação. As taxas de recolha de dados foram superiores a 90%, taxa mínima fixada no D.L. n.º111/2002, à excepção das estações de Abrantes e Mouriscas. Salienta-se que estas eficiências incluem as perdas devidas a calibração regular e manutenção normal dos equipamentos, que a taxa mínima de 90% da legislação não contabiliza.

A análise seguinte tem como objectivo identificar eventuais níveis de fundo de  $\text{SO}_2$  na região, ou eventuais problemas relacionados com os analisadores de  $\text{SO}_2$ . Este tipo de factores, se forem significativos, influenciam os níveis medidos, independentemente das emissões da Central do Pego, devendo de alguma forma ser tidos em conta na análise comparativa dos valores medidos com os valores simulados pelos modelos de qualidade do ar.

A Figura 21 mostra a evolução ao longo do ano de 2003 dos valores médios mensais de emissão de  $\text{SO}_2$  (considerando o total emitido pelos dois grupos) e de concentração daquele poluente no ar ambiente, nas seis estações remotas que integram a RMQA. Os valores de emissão são lidos na escala da esquerda do gráfico e as concentrações no ar ambiente na escala da direita. Estão também representadas as concentrações médias anuais.

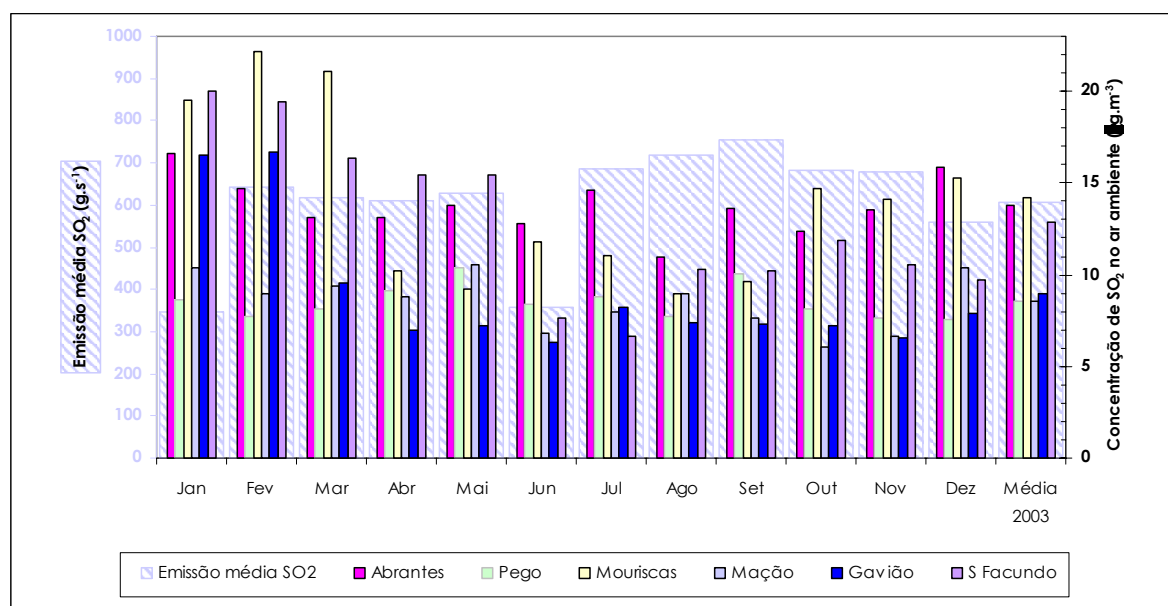


Figura 21 – Emissão de  $\text{SO}_2$  da Central do Pego ( $\text{g.s}^{-1}$ ) e concentrações de  $\text{SO}_2$  ( $\mu\text{g.m}^{-3}$ ) no ambiente medidas na RMQA: valores médios mensais e anuais (2003)

Observa-se, nesta figura, que os níveis médios mensais de emissão de  $\text{SO}_2$  pela Central se mantiveram relativamente constantes ao longo do ano 2003, à excepção dos meses de Janeiro e de Junho, em que a emissão média mensal foi cerca de metade do valor médio anual. Nos meses de Julho a Novembro, o valor médio de emissão foi ligeiramente maior do que a média anual.

As concentrações médias mensais de  $\text{SO}_2$  variaram de forma significativa ao longo do ano, particularmente nas estações de S. Facundo, Gavião e Mouriscas. A figura anterior põe em evidência não existir, em termos de variações mensais, uma relação de causalidade entre os níveis médios de emissão da Central do Pego e de qualidade do ar. De facto, por um lado, o padrão de variação nos níveis de qualidade do ar ao longo dos meses é diferente consoante a estação; por outro lado, nos meses em que a taxa de emissão variou consideravelmente, essa variação foi acompanhada, muitas vezes, de uma tendência contrária em termos de qualidade do ar; é o caso de Janeiro, mês em que foram atingidos, nalgumas estações, níveis da ordem dos mais altos verificados no ano, e do período de Maio a Julho, em que as variações na emissão não foram correspondidas por variações proporcionais de concentrações no ambiente. A análise da relação entre a taxa de emissão da Central do Pego e as concentrações de  $\text{SO}_2$  medidas na RMQA será retomada no capítulo 4.4.

A Figura 22 pretende complementar a análise anterior, comparando os valores médios mensais (em cima) e mínimos mensais (em baixo) para cada uma das estações de qualidade do ar. A escala usada nos dois gráficos é a mesma, para facilitar a comparação.

4. DESCRIÇÃO DO CASO DE ESTUDO

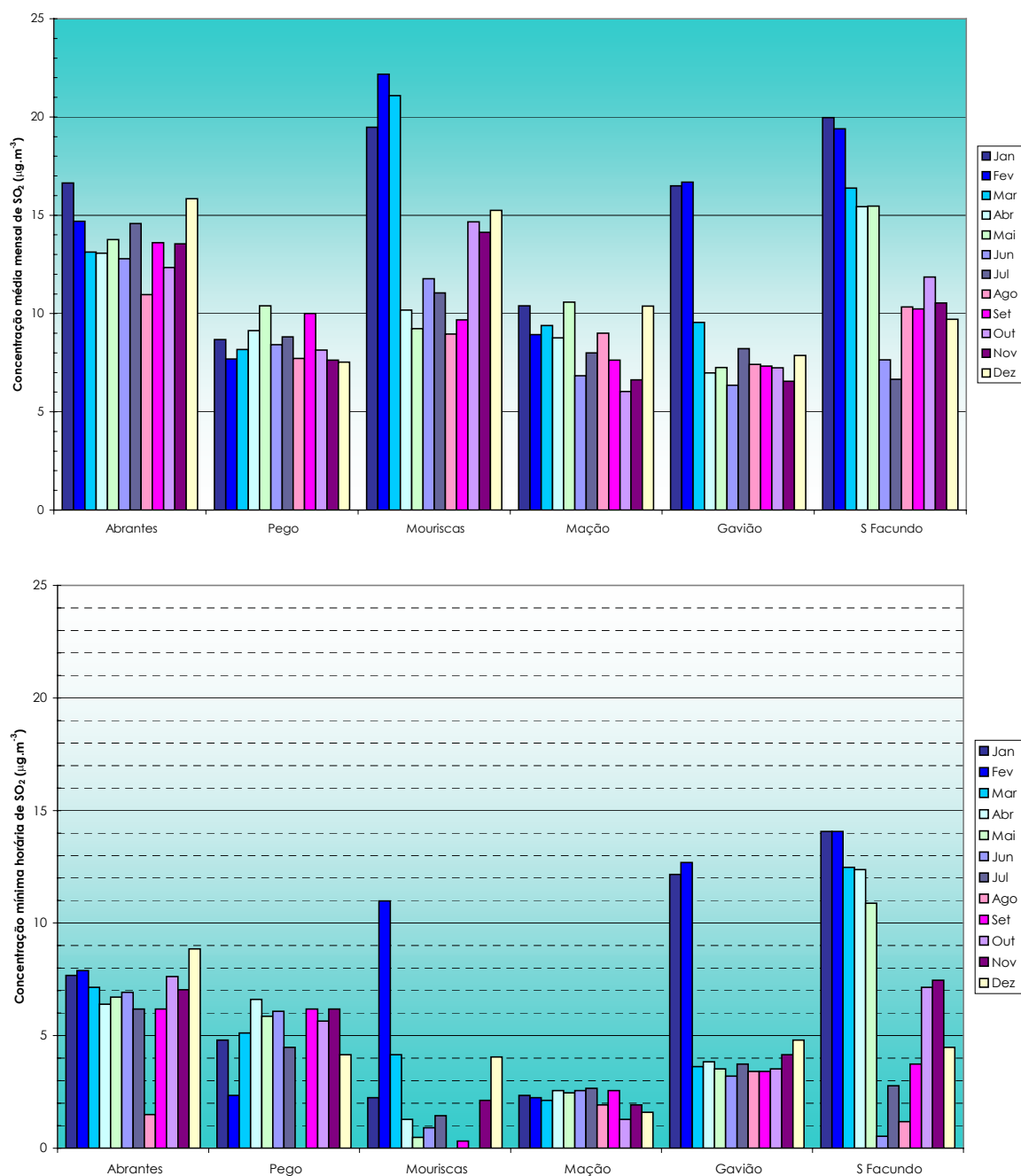


Figura 22 – Valores médios (em cima) e mínimos (em baixo) mensais de SO<sub>2</sub> (µg.m<sup>-3</sup>) por estação da RMQA

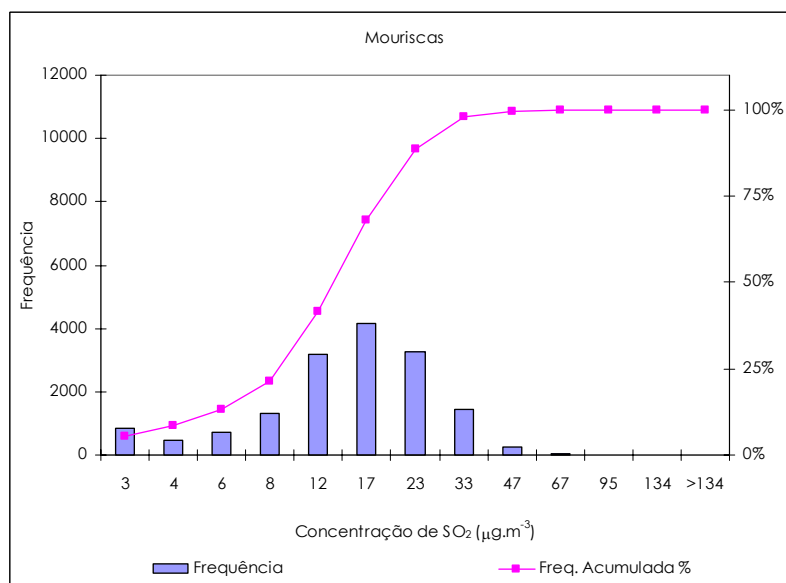
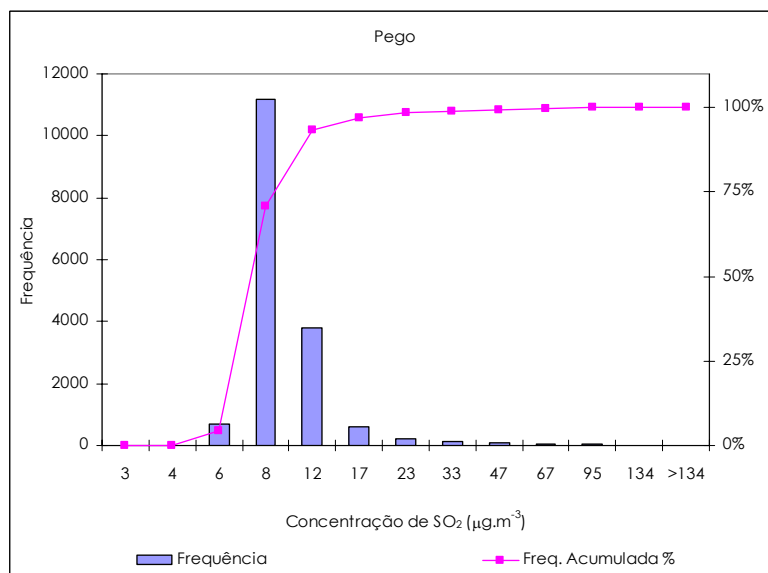
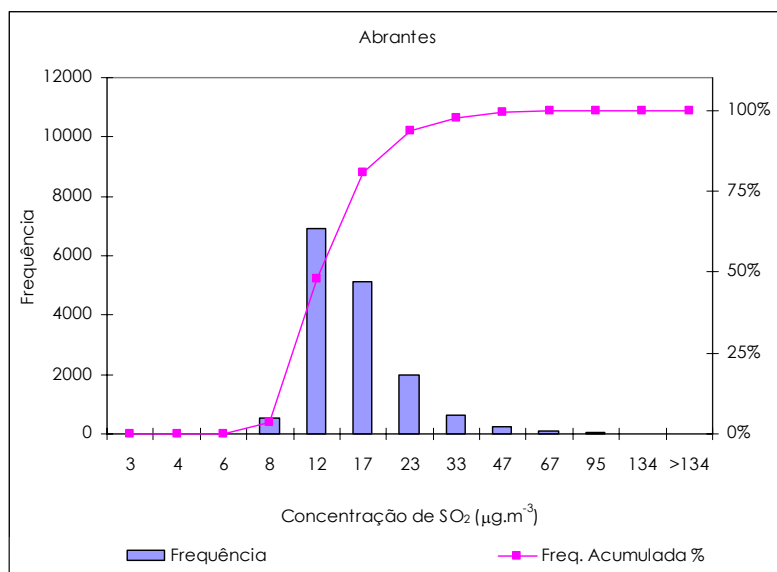
Em termos de concentrações médias mensais de SO<sub>2</sub> (gráfico superior), os valores mantêm-se sempre relativamente elevados ao longo do ano em Abrantes, enquanto que no Pego e em Mação os valores se mantêm quase sempre abaixo de 10 µg.m<sup>-3</sup>. Observa-se um incremento apreciável nos primeiros meses do ano nas estações de Mouriscas (Janeiro a Março), Gavião (Janeiro e Fevereiro) e S. Facundo (Janeiro a Maio). O mesmo aumento relativo também se verifica na série

dos valores mínimos (gráfico inferior) para o Gavião e S. Facundo, também para as Mouriscas em Fevereiro.

Os valores médios de razão de mistura de  $\text{SO}_2$  no ar continental poluído e em zonas costeiras da Europa são, respectivamente, da ordem de 1500 ppt ( $4 \mu\text{g.m}^{-3}$ ) e 260 ppt ( $0,7 \mu\text{g.m}^{-3}$ ) [Seinfeld e Pandis, 1998]. Os níveis de fundo de  $\text{SO}_2$  na região do Pego deverão estar compreendidos entre estes dois valores de referência; no entanto, dado que o limite de detecção dos analisadores de  $\text{SO}_2$  instalados na RMQA é da ordem de 1 ppb ( $2,7 \mu\text{g.m}^{-3}$ ), é de esperar um valor mínimo próximo deste valor. Em Mação, o mínimo aproxima-se desse limite; nas Mouriscas, o mínimo é dessa ordem de grandeza ou inferior, a maior parte dos meses. Nas restantes estações é, regra geral, maior, sendo nítidas as variações acentuadas dos valores mínimos, ao longo do ano, verificadas no Gavião, S. Facundo e nas Mouriscas, nos períodos já referidos.

A Figura 23 apresenta histogramas de concentração de  $\text{SO}_2$  para as estações da RMQA, construídos com valores de base média semi-horária. Em cada um dos histogramas está representada a frequência, ou o número de valores semi-horários inferiores ao valor de concentração indicado em abcissas, e a frequência acumulada (%).

4. DESCRIÇÃO DO CASO DE ESTUDO



(cont.)

4. DESCRIÇÃO DO CASO DE ESTUDO

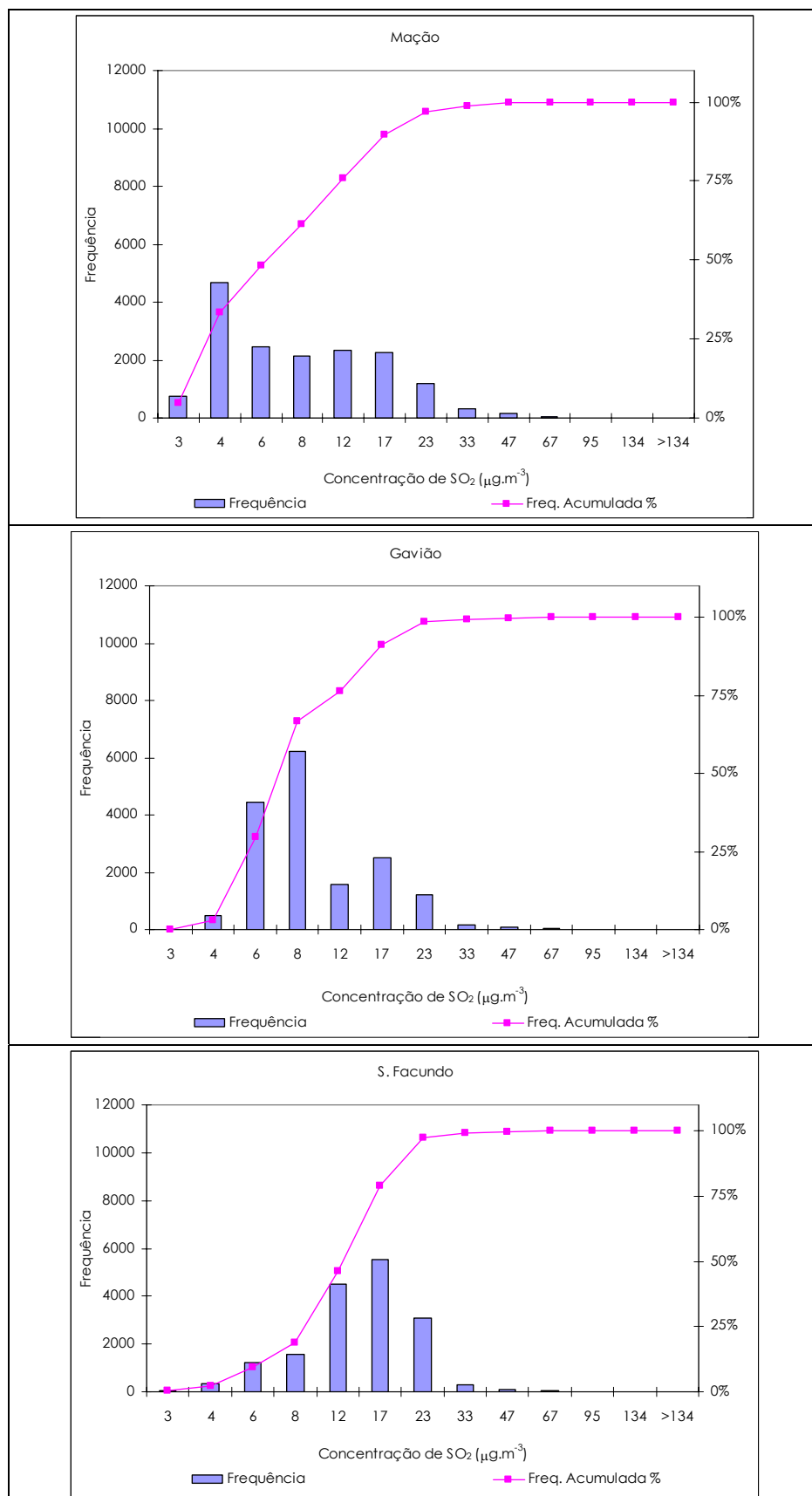


Figura 23 – Histogramas anuais das concentrações médias semi-horárias para as seis estações da RMQA: frequência (nº de médias semi-horárias) e frequência acumulada (%).

No histograma relativo à estação de Abrantes é visível o empobrecimento da série anual dos valores semi-horários para valores inferiores a  $8 \mu\text{g.m}^{-3}$ , correspondendo este intervalo a cerca de 4%, apenas, do total de dados. Embora de forma menos evidente, também nas outras estações se nota que as concentrações medidas se mantêm acima de um nível mínimo superior ao limite de detecção do analisador, à excepção de Mação. Este valor de base pode corresponder a um nível de  $\text{SO}_2$  de fundo, que se mantêm independentemente da direcção do vento e de outras condições meteorológicas, ou a uma eventual deriva periódica do zero do analisador.

Para perceber de que forma este aspecto deverá ser tido em conta na comparação dos valores estimados pelos modelos com os valores medidos, em termos de médias anuais e, eventualmente diárias, analisou-se a evolução das concentrações semi-horárias ao longo do ano, em cada uma das estações da RMQA – Figura 24 à Figura 29.

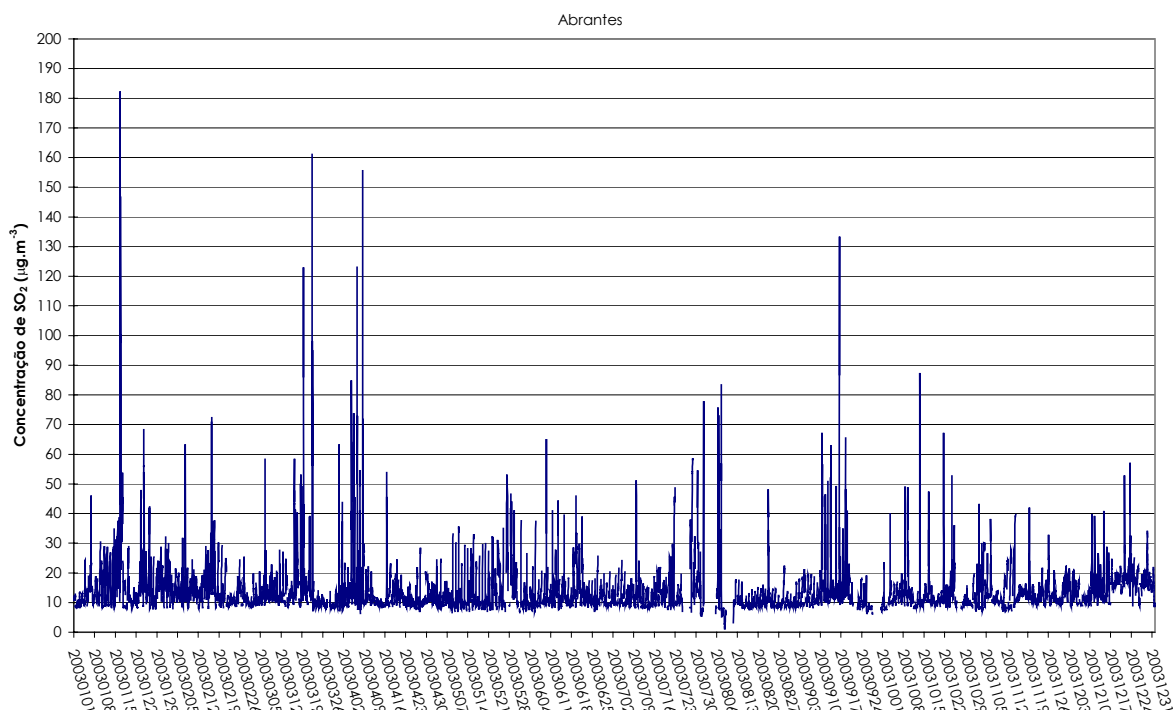


Figura 24 – Estação de Abrantes: evolução das concentrações médias semi-horárias de  $\text{SO}_2$  ( $\mu\text{g.m}^{-3}$ ) em 2003



4. DESCRIÇÃO DO CASO DE ESTUDO

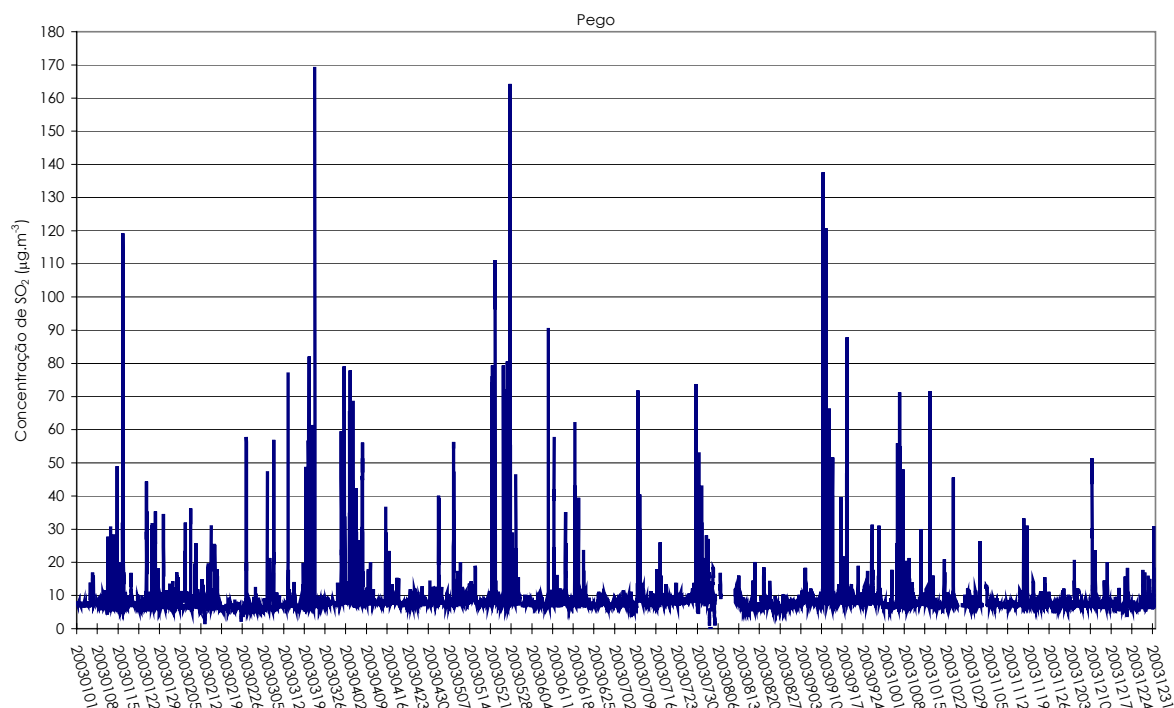


Figura 25 – Estação do Pego: evolução das concentrações médias semi-horárias de  $\text{SO}_2$  ( $\mu\text{g.m}^{-3}$ ) em 2003

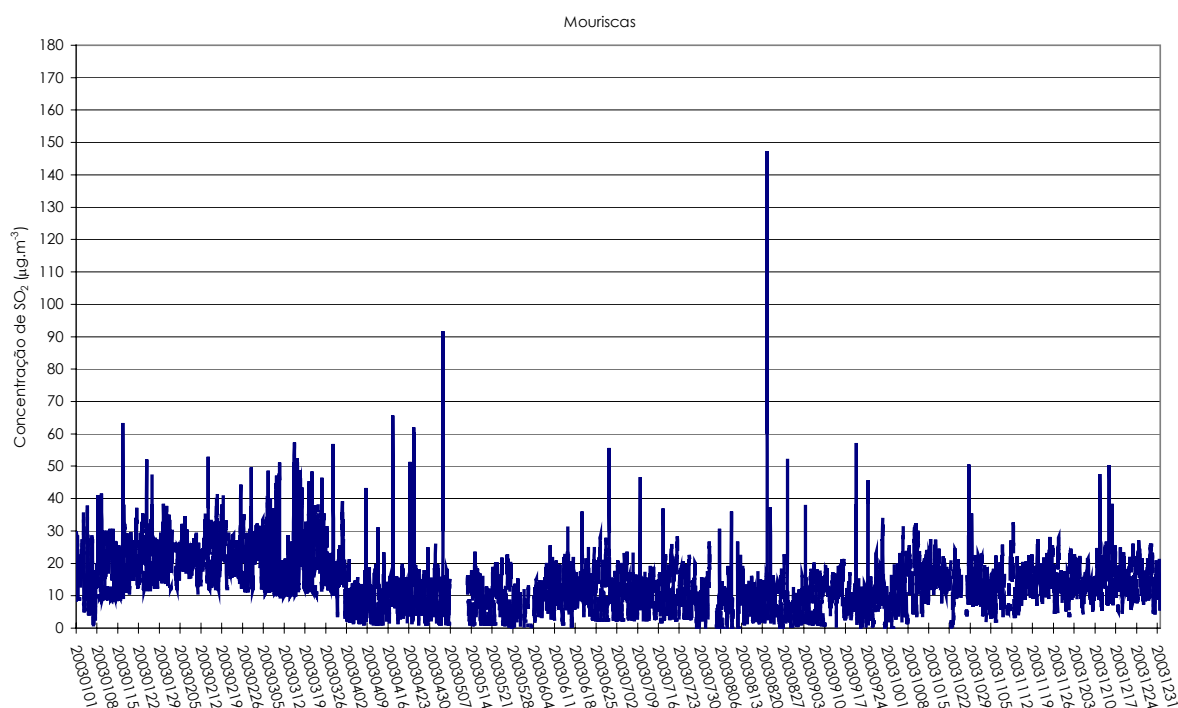


Figura 26 – Estação de Mouriscas: evolução das concentrações médias semi-horárias de  $\text{SO}_2$  ( $\mu\text{g.m}^{-3}$ ) em 2003

4. DESCRIÇÃO DO CASO DE ESTUDO

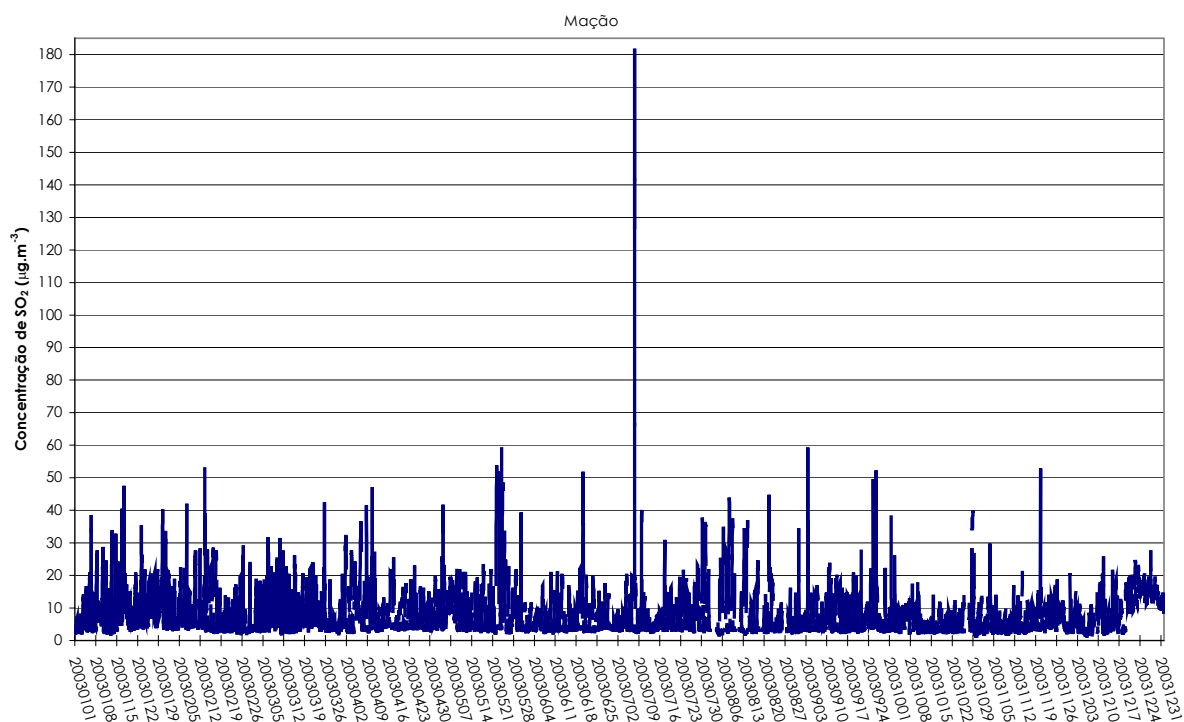


Figura 27 – Estação de Mação: evolução das concentrações médias semi-horárias de SO<sub>2</sub> (µg.m<sup>-3</sup>) em 2003

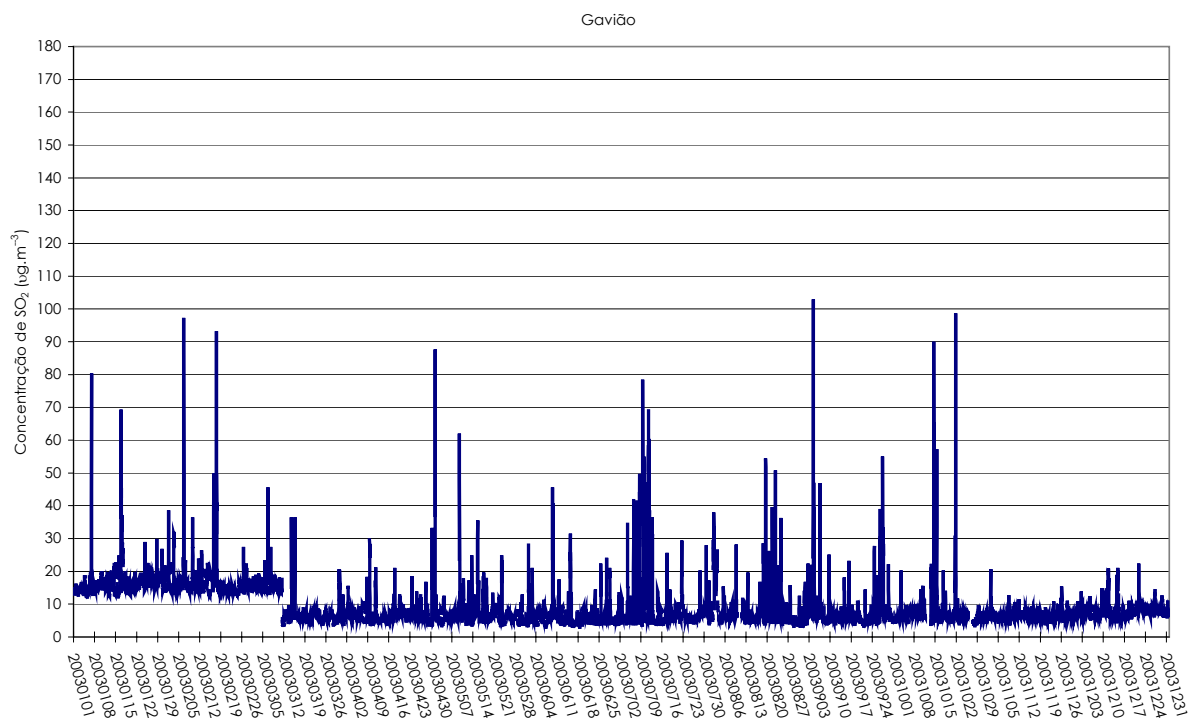


Figura 28 – Estação do Gavião: evolução das concentrações médias semi-horárias de SO<sub>2</sub> (µg.m<sup>-3</sup>) em 2003

4. DESCRIÇÃO DO CASO DE ESTUDO

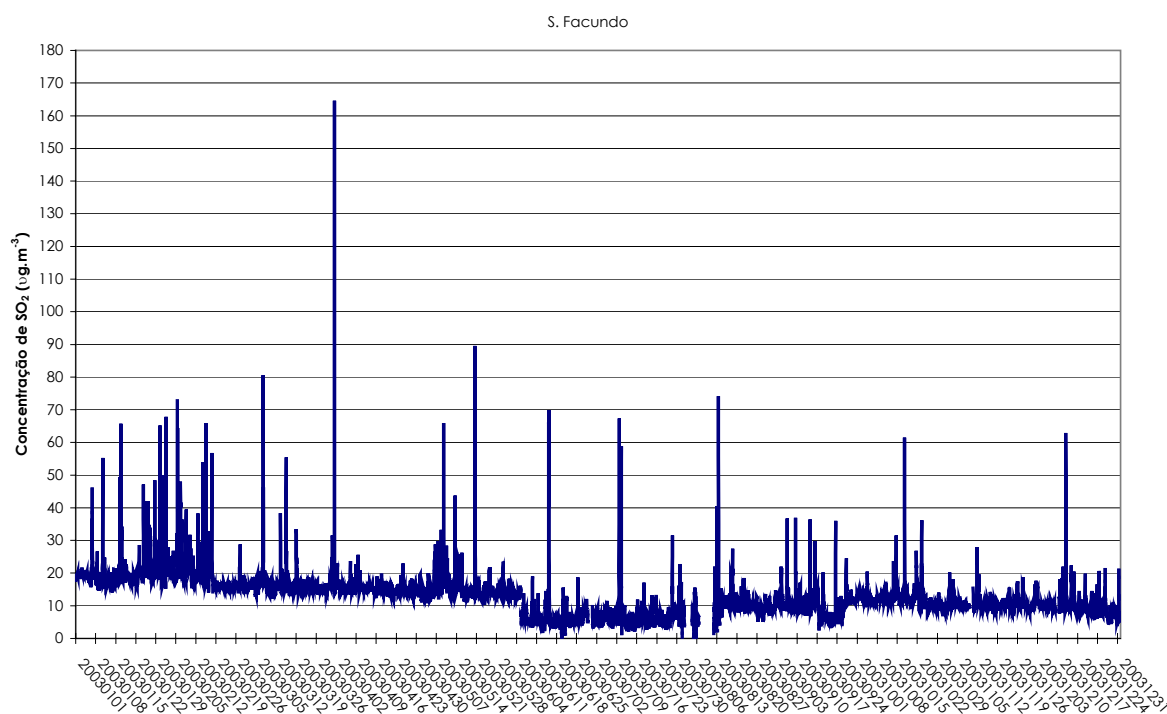


Figura 29 – Estação de S. Facundo: evolução das concentrações médias semi-horárias de  $\text{SO}_2$  ( $\mu\text{g.m}^{-3}$ ) em 2003

É visível, nestas figuras, a existência de diferentes patamares de valores mínimos de concentração, com a duração de alguns meses. Em Abrantes observa-se, claramente, que as concentrações se mantêm, a maior parte do tempo, acima de um valor mínimo, próximo de  $10 \mu\text{g.m}^{-3}$ . No Pego, o nível mínimo medido mantém-se a maior parte do tempo ligeiramente abaixo de  $10 \mu\text{g.m}^{-3}$ . Nas Mouriscas o nível de base mantém-se alto – entre  $10$  e  $15 \mu\text{g.m}^{-3}$  – desde o início de Janeiro até Abril, e a partir de meados de Outubro até ao final do ano. De Abril a Outubro o nível base aproxima-se do limite de detecção do analisador. Em Mação, o nível mínimo mantém-se bastante estável e próximo de  $3 \mu\text{g.m}^{-3}$ , sofrendo um aumento apenas no final de Dezembro. No Gavião é perceptível um patamar de concentrações alto, maior do que  $15 \mu\text{g.m}^{-3}$ , que se mantém até meados do mês de Março, altura em que decresce para cerca de  $5 \mu\text{g.m}^{-3}$ . Em S. Facundo são visíveis diferentes patamares ao longo do ano: cerca de  $19 \mu\text{g.m}^{-3}$ , até meados de Fevereiro;  $14 \mu\text{g.m}^{-3}$ , até Junho; cerca de  $5 \mu\text{g.m}^{-3}$  de Junho a Agosto, e um último de  $9-10 \mu\text{g.m}^{-3}$  que se mantém até ao final do ano, embora com algumas flutuações.

Na Figura 21 tinha já sido notado que os valores mínimos e médios mensais nos primeiros meses do ano, no Gavião e em S. Facundo, eram bastante mais elevados do que os dos meses seguintes. Esta diferença é devida a um desvio do zero do analisador, que se verificou durante esse período, e não a um aumento das concentrações no ambiente.

Na Figura 30 estão representadas as rosas anuais de poluição das concentrações médias horárias de  $\text{SO}_2$ , para as seis estações de qualidade do ar. No Anexo A apresentam-se, ainda, as rosas de poluição associadas a cada estação do ano.

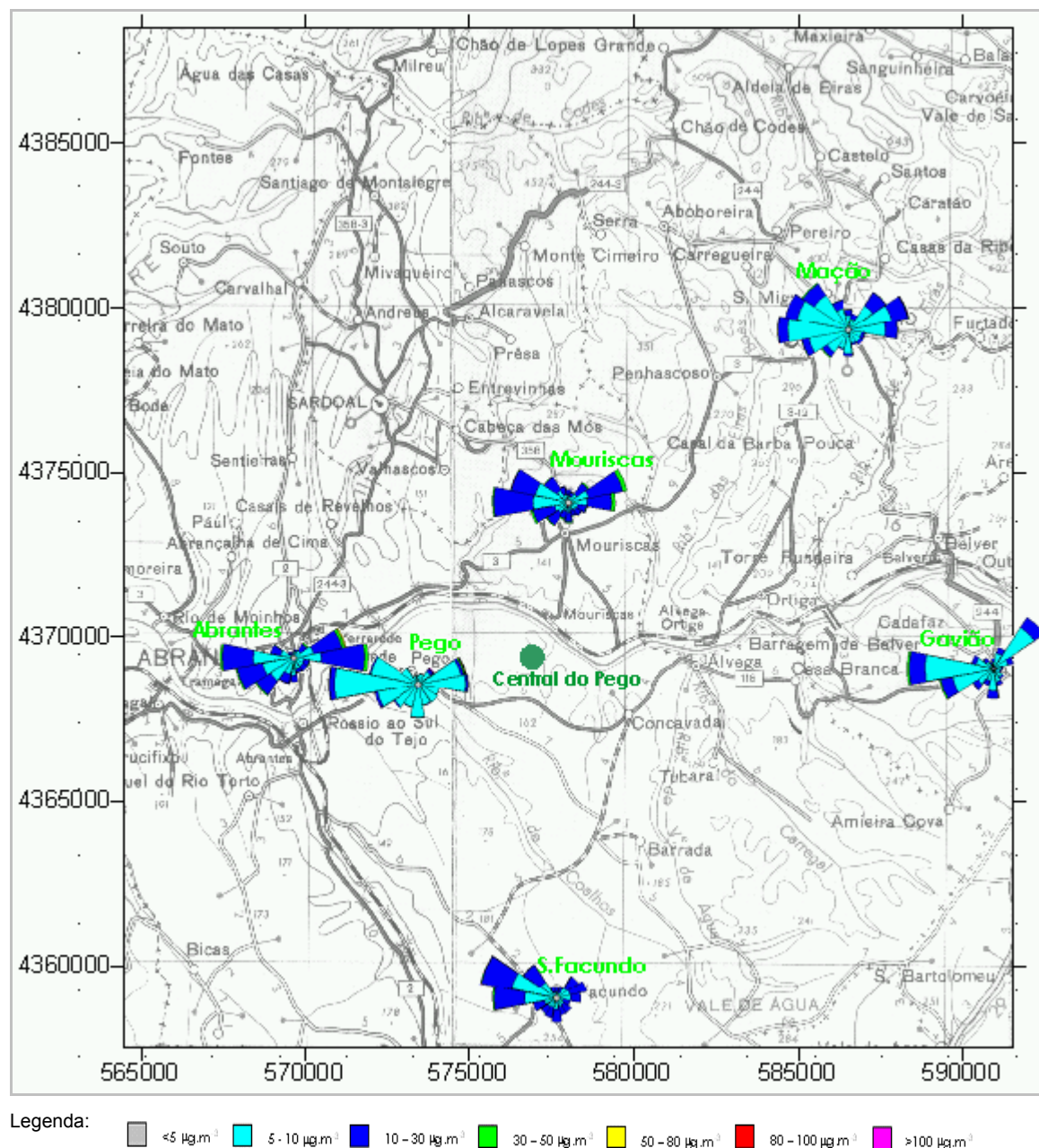


Figura 30 – Rosas anuais de poluição das concentrações médias horárias de  $\text{SO}_2$

As rosas de poluição representadas na figura mostram a frequência relativa de ocorrência de concentrações médias de  $\text{SO}_2$ , para os intervalos de concentração indicados, com a direcção do vento, em 2003. Estas rosas foram elaboradas com base nos dados de direcção e intensidade do vento registados em cada estação da RMQA – à excepção de Abrantes, onde não há sensores

meteorológicos instalados, e por isso se recorreu aos dados medidos na estação meteorológica principal da Central do Pego, a 10 metros.

A escala de cores usada é indicada na legenda da figura. Concentrações da ordem de  $4 \mu\text{g.m}^{-3}$  ou inferiores estão representadas por um círculo a cinzento, independentemente da direcção do vento. Este valor corresponde ao valor de poluição de fundo esperado para o ar continental poluído, já referido anteriormente.

Da análise comparativa feita das concentrações medidas e da direcção do vento (sectores de  $22,5^\circ$  de largura) conclui-se que:

1. Abrantes: valores de  $\text{SO}_2$  superiores a  $50 \mu\text{g.m}^{-3}$  (50 horas no ano) são mais frequentes quando o vento sopra do quadrante Este, do lado da Central, ocorrendo 32 horas no ano (19 das quais na Primavera) com ventos soprando de  $45$  a  $90^\circ$ , mas principalmente do sector  $67,5^\circ$  (cerca de metade dos valores) – o que sugere um efeito de rotação em altura do penacho da Central (na direcção dos ponteiros do relógio), ou a influência da zona industrial de Alferrarede ou, eventualmente, um efeito localizado do vento em Abrantes não sentido na Central. As concentrações verificadas no intervalo inferior da rosa de ventos, entre  $30$  e  $50 \mu\text{g.m}^{-3}$ , estão relacionadas não só com ventos provenientes do quadrante Este, como também de Oeste, possivelmente relacionadas com a influência da fábrica de pasta de papel de Constância. Valores de concentração nos intervalos  $5\text{-}10 \mu\text{g.m}^{-3}$  (3139 horas) e  $10\text{-}30 \mu\text{g.m}^{-3}$  (3020 horas) – ilustrados nas rosas de poluição a azul claro e azul escuro – ocorrem independentemente da direcção do vento, o que reflecte o nível de base dos registos do analisador observado nas figuras anteriores, próximo de  $10 \mu\text{g.m}^{-3}$  a maior parte do ano.
2. Pego: tal como em Abrantes, as concentrações de  $\text{SO}_2$  acima de  $50 \mu\text{g.m}^{-3}$  (35 horas no ano) são mais frequentes quando o vento sopra do quadrante Este, do lado da Central, ocorrendo 26 horas no ano (16 na Primavera) com ventos soprando dos sectores de  $45$  a  $90^\circ$ , cerca de metade de  $67,5^\circ$ , do lado da Central. Valores de concentração entre  $30$  e  $50 \mu\text{g.m}^{-3}$  estão ainda relacionados sobretudo com ventos daquele quadrante; valores entre  $10$  e  $30 \mu\text{g.m}^{-3}$  ocorrem com frequência deste mesmo quadrante mas a predominância é de Oeste. Na maior parte do ano (6733 horas) as concentrações medidas são inferiores a  $10 \mu\text{g.m}^{-3}$ , independentemente da direcção do vento, correspondendo ao valor de base do registo anual das concentrações semi-horárias observado, próximo de  $8 \mu\text{g.m}^{-3}$ .
3. Mouriscas: relativamente às concentrações mais altas que foram medidas nesta estação em 2003, foram registados apenas 16 valores compreendidos entre  $50$  e  $80 \mu\text{g.m}^{-3}$  de  $\text{SO}_2$ , com ventos soprando entre  $67,5^\circ$  e  $270^\circ$ , sem predominância clara de nenhum sector, e 1 valor de pico, superior a  $100 \mu\text{g.m}^{-3}$ , verificado com vento de SW ( $225^\circ$ ). Abaixo de  $30 \mu\text{g.m}^{-3}$  não é possível associar qualquer padrão de distribuição com a direcção do

vento. O facto do “zero” do analisador no Inverno ser superior a  $10 \mu\text{g.m}^{-3}$  (entre 10 e  $15 \mu\text{g.m}^{-3}$ ), a maior parte do tempo, é visível na rosa de ventos desta estação do ano (Anexo A); na Primavera e no Verão o nível base do analisador manteve-se, em geral, abaixo de  $5 \mu\text{g.m}^{-3}$ , pelo que se nota um incremento de concentrações na gama do azul claro ( $5\text{-}10 \mu\text{g.m}^{-3}$ ).

4. Mação: nesta estação verificaram-se apenas 10 valores acima de  $50 \mu\text{g.m}^{-3}$ , mas inferiores a  $80 \mu\text{g.m}^{-3}$ , à excepção de 1 valor de pico isolado, superior a  $100 \mu\text{g.m}^{-3}$ . A direcção de vento associada a estes valores foi variável. O pico de  $161 \mu\text{g.m}^{-3}$  (média horária, tendo sido atingido o valor semi-horário de  $181 \mu\text{g.m}^{-3}$ ) foi um acontecimento isolado no ano, sendo a segunda concentração mais alta ocorrida em 2003 já inferior a  $60 \mu\text{g.m}^{-3}$ ; a direcção média do vento na hora de ocorrência do pico era favorável ao transporte do penacho da Central para Mação. Para as concentrações inferiores a  $50 \mu\text{g.m}^{-3}$  não é possível associar uma direcção de vento predominante. O nível “zero” do analisador manteve-se sempre abaixo de  $5 \mu\text{g.m}^{-3}$  (à excepção do final de Dezembro), predominando o azul claro nas rosas de ventos.
5. Gavião: ocorreram 15 horas com valores de  $\text{SO}_2$  acima de  $50 \mu\text{g.m}^{-3}$  e 67 horas entre 30 e  $50 \mu\text{g.m}^{-3}$ ; na maioria destas horas o vento soprava dos sectores  $270^\circ$  e  $247,5^\circ$ , isto é, do lado da Central (e da zona industrial próxima). Concentrações inferiores a  $30 \mu\text{g.m}^{-3}$  verificam-se em condições variáveis de direcção do vento, embora com alguma predominância daqueles sectores e de  $45^\circ$ . É bastante claro, nas rosas de poluição, o aumento dos valores medidos no Inverno, face às outras estações, que é devido não a um aumento real das concentrações no ambiente, mas sim ao desvio do “zero” do analisador (Figura 28) verificado de Janeiro até ao início de Março.
6. S. Facundo: ocorreram 21 valores superiores a  $50 \mu\text{g.m}^{-3}$  e 82 horas entre 30 e  $50 \mu\text{g.m}^{-3}$ , a maioria para sectores de vento entre  $270^\circ$  e  $360^\circ$  (a Central está situada a NNW de S. Facundo, aproximadamente  $337,5^\circ$ ). Valores de concentração menores do que  $30 \mu\text{g.m}^{-3}$  ocorreram com ventos de todos os quadrantes. As rosas de vento da Primavera e do Inverno reflectem o desvio permanente do zero do analisador que se verificou nestes meses e não um aumento real das concentrações. No Verão está representada uma frequência alta de ocorrência de concentrações inferiores a  $5 \mu\text{g.m}^{-3}$  (cor cinzenta) que corresponde, na realidade, a um período em que não há registos de concentrações.

Em resumo, de um modo geral pode afirmar-se que as concentrações medidas nas seis estações da RMQA são relativamente baixas, sendo os valores de pico pouco frequentes e pouco elevados. A influência da Central faz-se sentir, de forma mais clara, nas estações de Abrantes, Pego e Gavião, quando se consideram os intervalos de concentrações mais altas observadas (superiores a  $50 \mu\text{g.m}^{-3}$ ). Nas estações de Abrantes, Pego e S. Facundo verificam-se, no entanto, valores de

4. DESCRIÇÃO DO CASO DE ESTUDO

concentração superiores a  $50 \mu\text{g.m}^{-3}$  em condições de ocorrência de ventos do quadrante Oeste, podendo estar relacionados com outras fontes existentes na região (a fábrica de pasta de papel de Constância, ou outras unidades industriais existentes em Alferrarede, no Tramagal, ou Rossio ao Sul do Tejo).

A análise da distribuição de concentrações por sectores de vento, que serviu de base à elaboração das rosas de vento, foi útil na medida em que evidenciou a correlação entre os valores de concentração mais altos registados e a Central do Pego. No que respeita aos valores baixos de concentrações, mais do que dar informação real sobre as concentrações no ar, evidenciou alguns desvios do zero do analisador, traduzindo os diferentes “patamares” mínimos de concentração observados nos registos anuais (Figura 24 a Figura 29).

Os valores médios para intervalos de longa duração, como a média anual ou mesmo as médias diárias, são influenciados de forma significativa pelos desvios do analisador relativamente ao zero. Estes desvios, ou o nível de fundo de  $\text{SO}_2$  que se pode confundir com o próprio limite de detecção dos analisadores, nos casos em que o desvio do analisador é menor (como em Mação), irão ser considerados quando da comparação dos valores estimados pelos modelos com os valores medidos.

A Figura 31 resume os parâmetros estatísticos associados às séries de concentrações de  $\text{SO}_2$  obtidas nas seis estações da RMQA, em termos de médias semi-horárias.

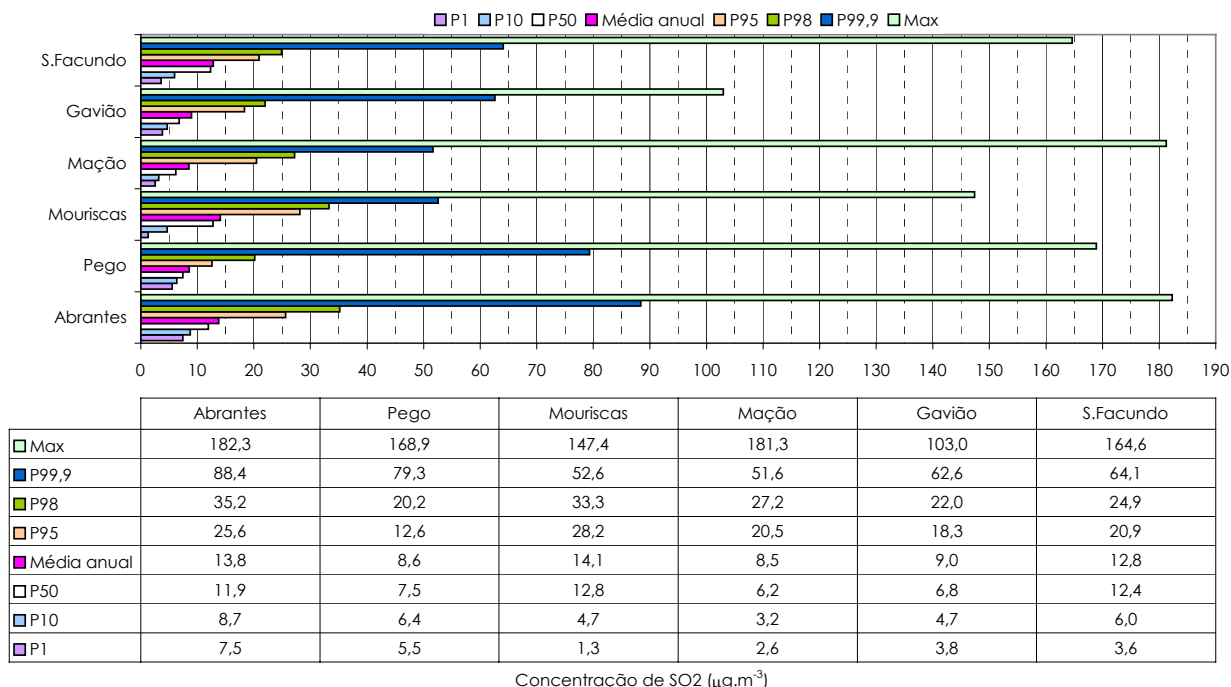


Figura 31 – Parâmetros estatísticos ( $\mu\text{g.m}^{-3}$ ) das séries de concentrações médias semi-horárias das estações da RMQA, para o ano 2003

Salienta-se que os valores máximos representados na Figura 31, por serem semi-horários, são maiores do que os máximos horários no Quadro 11, sendo a diferença importante no caso da estação de S. Facundo; os valores do percentil 98 são semelhantes nos dois casos.

Ressalta, da figura anterior, a grande amplitude que se verifica, em todas as estações, entre o valor máximo semi-horário observado e o percentil 99,9 ou o percentil 98, menos marcada no caso do Gavião. Os valores máximos mais altos ocorreram nas estações de Abrantes e Mação, e o mais baixo no Gavião. O pico verificado em Mação foi, como se viu anteriormente (Figura 27), um valor episódico, sendo o valor de percentil 99,9 nesta estação o mais baixo da RMQA, mas semelhante ao de Mouriscas; os valores mais altos do percentil 99,9 ocorreram em Abrantes e no Pego. Observa-se, ainda, que o percentil 98 é bastante baixo em todas as estações, variando entre  $20 \mu\text{g.m}^{-3}$  (Pego) e  $35 \mu\text{g.m}^{-3}$  (Abrantes). As diferenças entre os percentis 98 e 95 e o valor médio são bastante pequenas na estação do Pego, a mais próxima da Central, sendo os valores destes três parâmetros baixos, o que mostra que a ocorrência de concentrações altas em 2003 foi muito pouco frequente (concentrações acima de  $20 \mu\text{g.m}^{-3}$  ocorreram menos de 2% do ano).

Assim, duma forma geral, pode concluir-se que, em 2003, a ocorrência de concentrações de  $\text{SO}_2$  altas, ou moderadamente altas, na área de influência da RMQA, com origem na Central do Pego ou noutras fontes, foi muito pouco frequente, ligeiramente maior nas estações de Abrantes e Mouriscas.

#### 4.4 Qualidade do ar *versus* Emissões

O Quadro 12 compara dados de qualidade do ar verificados para horas sem dados de emissão (coincidentes com períodos de paragem da Central do Pego ou de indisponibilidade do sistema de monitorização de emissões), com dados verificados para horas com taxas de emissão superiores a 200, a 400 e a  $800 \text{ g.s}^{-1}$ . Estas taxas de emissão referem-se à soma das emissões do grupo 1 (G1) e do grupo 2 (G2).



Quadro 12 – Concentrações de SO<sub>2</sub> (μg.m<sup>-3</sup>) medidas nas estações da RMQA para diferentes taxas de emissão da Central do Pego

	Abrantes	Pego	Mouriscas	Mação	Gavião	S. Facundo	Central do Pego (G1+G2)
Concentrações horárias de SO <sub>2</sub> (μg.m <sup>-3</sup> ) para horas com emissão = 0 g.s <sup>-1</sup>							Emissão (g.s <sup>-1</sup> )
Valor médio	13	8	14	7	9	13	0
Mediana	12	7	13	5	7	12	0
Valor máximo	71	49	36	25	30	39	0
Percentil 98	32	16	31	19	18	22	0
Nº horas	290	321	297	311	323	336	388
Concentrações horárias de SO <sub>2</sub> (μg.m <sup>-3</sup> ) para horas com emissão >200 g.s <sup>-1</sup>							Emissão (g.s <sup>-1</sup> )
Valor médio	14	9	14	9	9	13	663
Mediana	12	8	13	6	7	12	736
Percentil 98	35	21	33	28	22	25	862
Valor máximo	143	113	121	161	92	90	918
Nº horas	6759	7220	6846	7144	7359	7583	7958
Concentrações horárias de SO <sub>2</sub> (μg.m <sup>-3</sup> ) para horas com emissão >400 g.s <sup>-1</sup>							Emissão (g.s <sup>-1</sup> )
Valor médio	14	9	14	9	9	13	729
Mediana	12	8	13	6	7	12	757
Percentil 98	36	21	33	29	23	24	865
Valor máximo	143	113	121	161	92	90	918
Nº horas	5523	5963	5666	5875	6093	6273	6591
Concentrações horárias de SO <sub>2</sub> (μg.m <sup>-3</sup> ) para horas com emissão >800 g.s <sup>-1</sup>							Emissão (g.s <sup>-1</sup> )
Valor médio	13	9	12	9	8	13	830
Mediana	11	8	11	6	6	13	826
Percentil 98	35	29	32	36	27	23	883
Valor máximo	143	113	121	161	92	90	918
Nº horas	1606	1841	1762	1760	1848	1953	1995

O valor médio de SO<sub>2</sub> no ar ambiente para as horas sem dados de emissão é semelhante aos valores médios obtidos para as taxas de emissão de 200, 400 g.s<sup>-1</sup> ou, inclusivamente para os períodos de funcionamento próximo da plena carga (emissão total acima de 800 g.s<sup>-1</sup>). Nota-se, no entanto, um acréscimo dos valores máximos em todas as estações quando se comparam as horas com emissão nula e as horas com emissão acima de 200 g.s<sup>-1</sup>. Em todas as estações os valores máximos ocorrem para emissão maior do que 800 g.s<sup>-1</sup>, em situação de plena carga. Os valores correspondentes ao percentil 98 diferem pouco nos quatro casos, à excepção de Mação, do Pego e do Gavião.

As três figuras seguintes – Figura 32 à Figura 34 – relacionam, de igual modo, as concentrações horárias de SO<sub>2</sub>, medidas em cada estação da RMQA, com os valores de emissão total horária da Central do Pego.

4. DESCRIÇÃO DO CASO DE ESTUDO

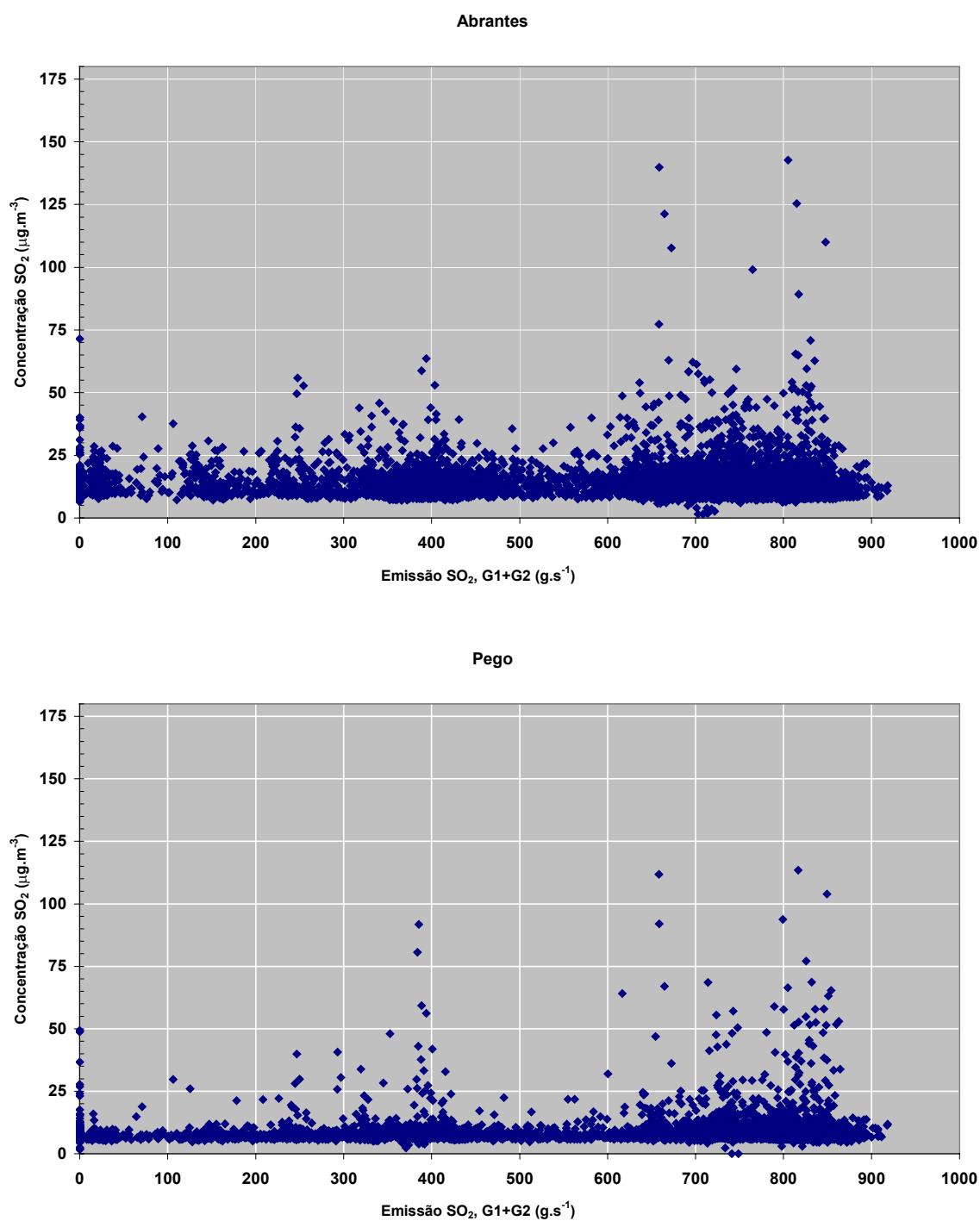


Figura 32 – Relação entre os valores médios horários de concentração de  $\text{SO}_2$  no ar ambiente ( $\mu\text{g.m}^{-3}$ ) e de emissão total da Central do Pego ( $\text{g.s}^{-1}$ ), em Abrantes e no Pego

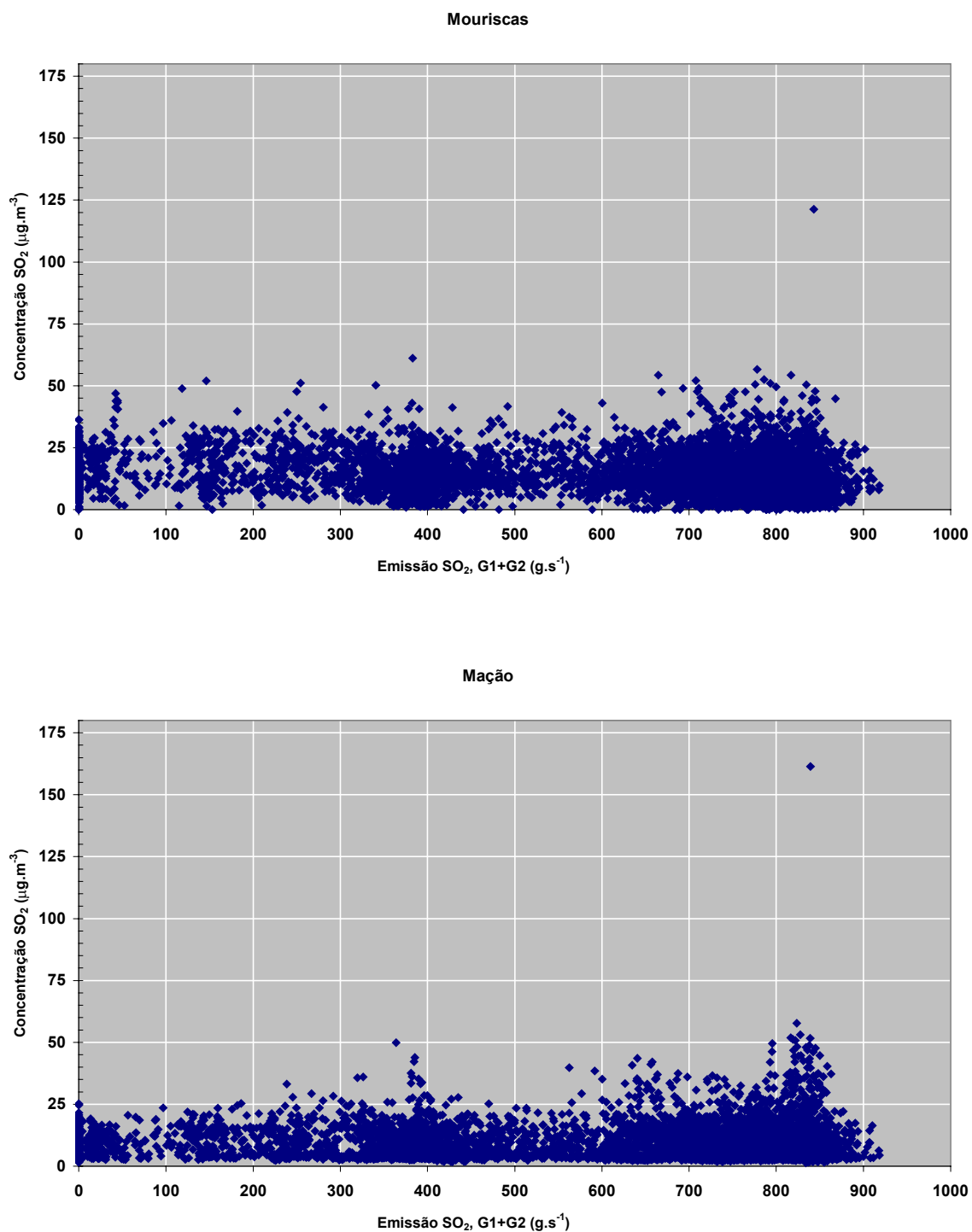


Figura 33 – Relação entre os valores médios horários de concentração de  $\text{SO}_2$  no ar ambiente ( $\mu\text{g.m}^{-3}$ ) e de emissão total da Central do Pego ( $\text{g.s}^{-1}$ ), nas Mouriscas e em Mação

4. DESCRIÇÃO DO CASO DE ESTUDO

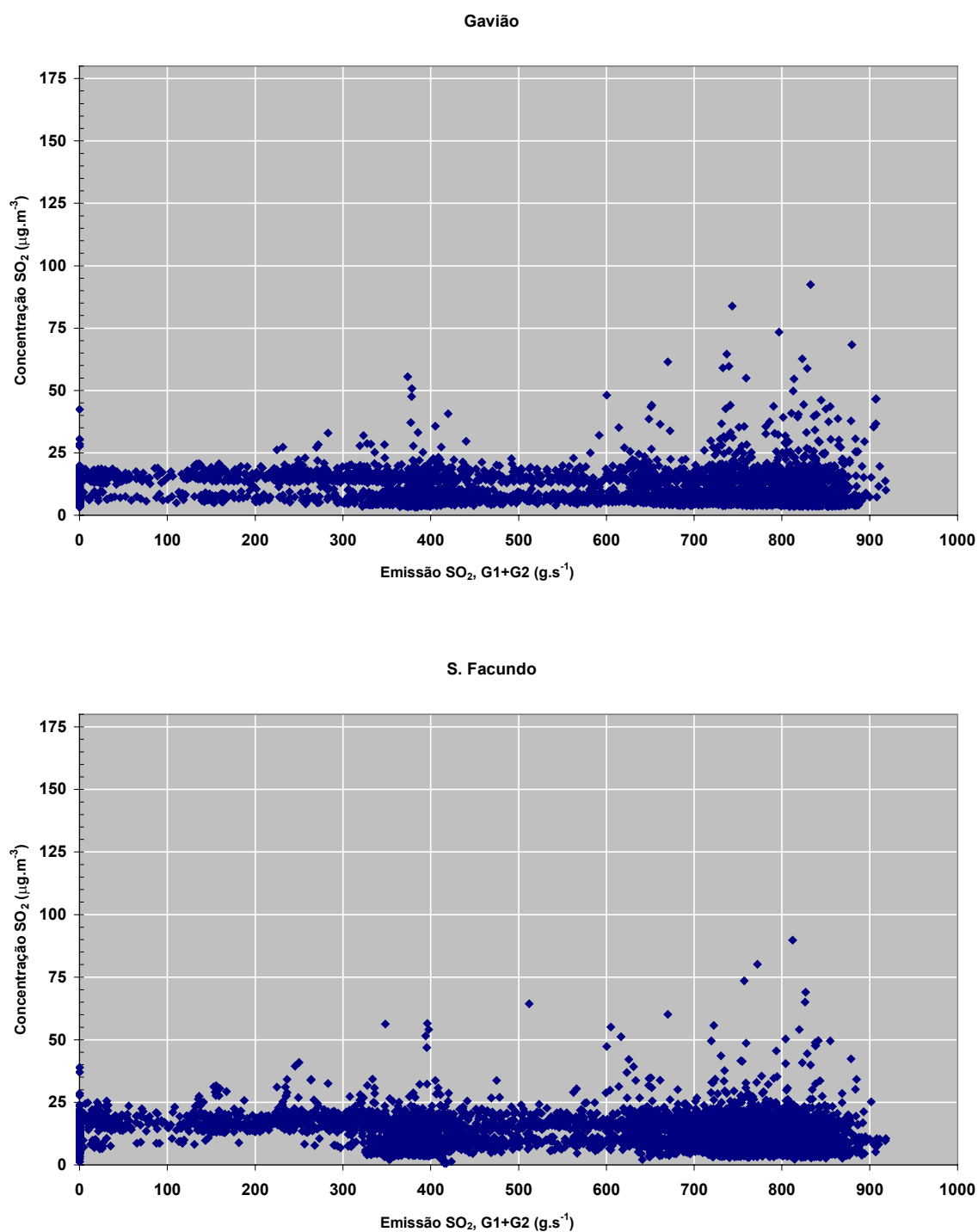


Figura 34 – Relação entre os valores médios horários de concentração de  $\text{SO}_2$  no ar ambiente ( $\mu\text{g.m}^{-3}$ ) e de emissão total da Central do Pego ( $\text{g.s}^{-1}$ ), no Gavião e em S. Facundo

As figuras sugerem existirem duas situações mais frequentes no que diz respeito às emissões da Central do Pego: emissão total de cerca de 300 a 450  $\text{g.s}^{-1}$  – possivelmente correspondente a um

grupo em funcionamento a plena carga e o outro grupo parado ou em situação transitória de arranque/paragem – e cerca de 600 a 850 g.s<sup>-1</sup> – com os dois grupos aproximadamente a plena carga, a situação mais frequente. É nestas duas zonas de emissão que ocorrem a maioria dos valores de concentração mais altos, medidos em cada estação.

Nesta análise há, também, que ter em conta o efeito dos patamares de base notados anteriormente nos registos de concentrações semi-horárias: em S. Facundo, por exemplo, as concentrações mantêm-se cerca de 5 meses entre 15 e 20 µg.m<sup>-3</sup>, em Abrantes o patamar mínimo mantêm-se todo o ano próximo de 10 µg.m<sup>-3</sup>, pelo que para concentrações desta ordem de grandeza não é de esperar qualquer relação directa com as emissões da Central.

Em Abrantes, Pego, Gavião e S. Facundo, valores de concentração superiores a cerca de 50 µg.m<sup>-3</sup> ocorrem, em geral, para taxas de emissão acima de 350 g.s<sup>-1</sup>, mais frequentemente acima de cerca de 600 µg.m<sup>-3</sup>; valores entre 25 e 50 µg.m<sup>-3</sup> são frequentes para emissão superior a cerca de 250 g.s<sup>-1</sup> e, sobretudo, acima de 600 g.s<sup>-1</sup>. Na figura correspondente à estação do Gavião são bem visíveis os dois patamares dos mínimos já referidos anteriormente, um inferior a 10 µg.m<sup>-3</sup> e o outro à volta de 15 µg.m<sup>-3</sup>.

Em Mação, são muito poucas as concentrações medidas acima de 50 µg.m<sup>-3</sup>; concentrações no ambiente maiores do que 25 µg.m<sup>-3</sup> ocorrem em simultâneo com emissões superiores a 250 g.s<sup>-1</sup>, mas com maior frequência para emissões acima de cerca de 600 g.s<sup>-1</sup>.

Nas Mouriscas não é possível estabelecer um padrão claro de relação entre as duas variáveis.

Verifica-se, assim, existir uma maior probabilidade de ocorrência dos valores mais altos medidos em cada estação em condições de funcionamento da Central próximas da plena carga, à excepção da estação de Mouriscas, em que não foi possível distinguir um padrão de variação claro.

O capítulo seguinte descreve a aplicação dos modelos ISCST3 e AERMOD ao caso de estudo apresentado no presente capítulo.

#### 4. DESCRIÇÃO DO CASO DE ESTUDO

## 5 APLICAÇÃO DOS MODELOS

Os modelos ISCST3 e AERMOD foram aplicados às emissões de SO<sub>2</sub> da Central do Pego, cuja localização, características físicas (meteorológicas, orográficas, uso do solo, etc.) da envolvente, a qualidade do ar e as características de emissão foram descritas no capítulo anterior. No presente capítulo resumem-se as condições de simulação e os pressupostos em que se baseou a aplicação dos modelos AERMOD e ISCST3 à Central Termoeléctrica do Pego e apresentam-se os resultados das simulações.

### 5.1 Condições de simulação

Numa primeira fase, foi analisada a influência nas concentrações estimadas pelo AERMOD da variação dos parâmetros dependentes do tipo de cobertura do solo: rugosidade superficial ( $z_0$ ), albedo ( $r'$ ) e razão de Bowen diurna ( $\beta_0$ ) (referidos em 3.3.3).

Em função dos resultados obtidos na análise referida, foram escolhidos os valores a atribuir a estes mesmos parâmetros na fase seguinte. Nas condições de simulação seleccionadas, a partir da informação incluída nos ficheiros meteorológicos de entrada no AERMOD (criados pelo AERMET Pro), foi preparado o ficheiro meteorológico de entrada no ISCST3.

Compararam-se os resultados obtidos pelos dois modelos, nos seis receptores discretos, com os dados de qualidade do ar medidos nos mesmos pontos.

Finalmente, foram feitas novas simulações para todo o domínio de estudo, tendo os resultados obtidos com os dois modelos sido comparados entre si e à luz da legislação relativa à qualidade do ar.

#### 5.1.1 Fontes de emissão

O estudo centrou-se no poluente SO<sub>2</sub> e, como fontes de emissão de poluentes atmosféricos, nas duas chaminés da Central do Pego, consideradas de forma individualizada: a chaminé 1, associada ao grupo gerador de vapor 1 e a chaminé 2, associada ao grupo gerador 2. A sua influência na qualidade do ar foi analisada conjuntamente, isto é, como se de uma só fonte se tratasse.

Tendo sido verificado que a altura da chaminé satisfaz os critérios de Boas Práticas de Engenharia (Good Engineering Practice - GEP) recomendados pela U.S. EPA [U.S. EPA, 1985], considerou-se que as emissões das chaminés da Central do Pego não estão sujeitas à influência de eventuais efeitos de *downwash* aerodinâmico originados pela presença dos edifícios próximos [U.S. EPA, 2002b] e, por esse motivo, estes edifícios não foram tidos em conta nas simulações realizadas.

As simulações tiveram por base valores médios horários de emissão, incluindo taxa média de emissão de SO<sub>2</sub>, velocidade de exaustão e temperatura.

### 5.1.2 Domínio de simulação e receptores

O domínio de simulação abrange uma área de cerca de  $27 \times 31 \text{ km}^2$ , que inclui as seis estações da RMQA (Figura 8, capítulo 4.2.1).

Considerou-se uma malha cartesiana, com um espaçamento uniforme entre receptores de 1 km, e um total de 896 receptores. Além destes, foram também considerados 6 receptores discretos, cujas localizações coincidem com as das seis estações de qualidade do ar da Rede de Monitorização da Central do Pego (Abrantes, Pego, Mouriscas, Mação, Gavião e S. Facundo).

Na aplicação dos dois modelos foram incluídos os efeitos de elevação do terreno. As cotas dos receptores usadas pelos dois modelos foram as extraídas do modelo digital de terreno pelo pré-processador de terreno do AERMOD. No caso dos receptores discretos, foram usadas as cotas reais, que diferem ligeiramente das cotas extraídas (*vide* Quadro 5); a escala de altura ( $h_c$ ) atribuída a cada receptor nas simulações foi o maior valor entre o valor de  $h_c$  calculado pelo AERMAP e a cota real do terreno.

### 5.1.3 Opções de dispersão

As simulações foram realizadas considerando algumas das opções regulamentares que ambos os modelos, ou só o AERMOD, assumem por defeito e que se resumem seguidamente.

As opções relevantes para o caso de estudo incluem: efeito de *downwash* induzido pela chaminé, dispersão induzida pela impulsão, elevação final do penacho, aplicação de rotinas de cálculo de médias quando há ocorrência de calmas ou lacunas de dados meteorológicos e, para o ISCST3, valores por defeito para os expoentes do perfil do vento e para os gradientes de temperatura potencial.

O AERMOD assume, por defeito, a aplicação dos algoritmos de terreno complexo, tal como pretendido. No caso do ISCST3, é assumido por defeito terreno plano, tendo sido necessário especificar que os receptores estão situados em terreno elevado.

Foram especificadas médias de 1 hora, de 24 horas e anual, para os cálculos subsequentes efectuados pelos modelos.

Considerou-se que a área de estudo e, em particular, uma área circular com centro na Central do Pego e raio de 3 km, tem características predominantemente rurais.

### 5.1.4 Opções de meteorologia

A metodologia recomendada pela U.S. EPA para a selecção dos parâmetros relacionados com o uso do solo – albedo ( $r'$ ), rugosidade ( $z_0$ ), e razão de Bowen ( $\beta_0$ ) – é suficientemente genérica para que utilizadores diferentes adoptem valores significativamente diferentes, principalmente em áreas muito heterogéneas, como a do caso presente. É importante conhecer a resposta do modelo a



estes parâmetros, para que os valores de entrada sejam atribuídos com o rigor necessário. Foi com esse objectivo que foi levada a cabo a análise de sensibilidade do AERMOD aos três parâmetros referidos. Nestas simulações foram considerados apenas os receptores discretos correspondentes às estações da RMQA.

Foram efectuadas 12 simulações com o AERMOD, usando ficheiros meteorológicos diferentes, obtidos com o mesmo ficheiro meteorológico de base, mas alterando os valores atribuídos a  $r'$ ,  $z_0$  e  $\beta_0$ , particularmente os dois últimos. No Quadro 13 resumem-se os valores considerados.

Quadro 13 – AERMOD: variação dos parâmetros superficiais  $r'$ ,  $z_0$  e  $\beta_0$

Simulação	Condições de simulação	Rugosidade, $z_0$	Razão de Bowen, $\beta_0$	Albedo, $r'$	Altura mínima da camada de mistura ( $z_i$ ), <i>min MH</i>
1	—	0,05	0,5	0,2	100
2		0,1	0,1		5
3			0,3		
4			0,5		
5			2		
6		0,2	0,5		100
7					5
8		0,5			100
9		1,3			
10	Variação espacial; Valor médio	0,05< $z_0$ <0,7; $z_{0med}$ = 0,22	0,1< $\beta_0$ <1; $\beta_{0med}$ =0,5	- 0,15	10
11		0,05< $z_0$ <0,7; $z_{0med}$ = 0,22	0,1< $\beta_0$ <1; $\beta_{0med}$ =0,5	- 0,12	10
12		0,05< $z_0$ < 0,7; $z_{0med}$ = 0,21	0,1< $\beta_0$ <1; $\beta_{0med}$ =0,5	- 0,12	10
Pego	Variação espacial e sazonal; Valor médio	0,2< $z_0$ <0,5; $z_{0med}$ = 0,35	0,1< $\beta_0$ <1; $\beta_{0med}$ =0,7	0,12< $r'$ <19; $r'_{med}$ =0,13	10

Nas simulações efectuadas foi ainda alterado um terceiro parâmetro, o valor mínimo da altura da camada de mistura  $z_i$  que, juntamente com os valores mínimos de fluxo de calor sensível ( $0,001 \text{ W.m}^{-2}$ ) e comprimento de Obukhov (2 m), são requeridos pelo AERMET Pro e devem ser especificados pelo utilizador. O valor de  $z_i$  mínimo usado é apresentado na última coluna do quadro, condicionando a análise comparativa dos resultados.

Nas simulações 1 a 9 os intervalos de valores atribuídos aos três parâmetros não tiveram em conta as características da envolvente da Central do Pego; o único objectivo foi avaliar a magnitude da resposta do modelo a estas variações. Os valores dos parâmetros consideraram-se constantes no espaço e no tempo.

Foram testados valores de rugosidade entre 0,05 e 1,3, dentro do intervalo recomendado pela U.S. EPA para os vários tipos de uso do solo considerados no Manual do AERMET. O intervalo de variação usado para  $\beta_0$  (0,1-2,0) abrange os valores recomendados pela U.S. EPA para todos os tipos de uso do solo e estações do ano, à excepção dos valores mais elevados sugeridos para

vegetação desértica ou áreas urbanas sob condições de humidade baixa. A análise da influência de  $r'$  foi muito limitada, tendo sido baseada apenas em duas simulações (10 e 11) para valores intermédios: 0,12 e 0,15.

Nas simulações 10 a 12 os três parâmetros foram diferenciados espacialmente, segundo 8 sectores de vento (Figura 11). O número e a dimensão dos sectores foram definidos inicialmente em função da localização das estações de qualidade do ar e ajustados face aos resultados intermédios obtidos na análise de sensibilidade. Os parâmetros não foram variados ao longo do ano, tendo sido adoptados valores médios anuais sugeridos pelo próprio AERMET Pro [Trinity Consultants, 1991; Trinity Consultants, 2000]. Embora pouco realista, esta opção foi justificada por facilitar a interpretação da resposta do AERMOD à variação dos parâmetros. Da simulação 10 à 12, os valores escolhidos procuram o melhor ajuste possível dos resultados aos dados obtidos na RMQA. Nas simulações 10 e 11 mantiveram-se os valores de  $z_0$  e de  $\beta_0$ , procurando avaliar a influência da variação, ainda que pequena, de  $r'$  (de 0,15 para 0,12).

As corridas subsequentes, destinadas a comparar os resultados do ISCST3 e do AERMOD, foram efectuadas considerando as condições da simulação 12, que mais aproximou os resultados do AERMOD das observações da RMQA. O ficheiro meteorológico de base ao ISCST3 foi obtido a partir dos ficheiros meteorológicos de entrada no AERMOD que resultaram desta simulação, tal como referido no capítulo 3.3.5.1. No Quadro 14 apresentam-se os valores adoptados em cada sector. Alguns dos valores indicados diferem bastante do uso do solo existente no sector em causa (por exemplo, a atribuição de um valor de 0,1 (água) para a razão de Bowen em dois dos sectores).

Quadro 14 – Valores dos parâmetros superficiais atribuídos na simulação 12

Sectores (°)		Largura do sector (°)	Albedo	Bowen	Rugosidade
Início	Fim				
330	50	80	0,12	0,1	0,05
50	80	30	0,12	0,5	0,1
80	120	40	0,12	1,0	0,3
120	150	30	0,12	0,7	0,1
150	225	75	0,12	0,1	0,1
225	260	35	0,12	0,3	0,2
260	300	40	0,12	1,0	0,7
300	330	30	0,12	0,3	0,1

Na última simulação, designada por “Pego”, foram atribuídos aos três parâmetros superficiais os valores que resultam da melhor aproximação possível ao uso do solo na envolvente da Central. Os valores atribuídos e a metodologia usada foram anteriormente descritos em 4.2.3.

### 5.1.5 Opções de saída dos modelos

Para a malha de receptores e para os receptores discretos, o modelo forneceu tabelas de primeiros, segundos e décimos valores mais altos de todas as médias especificadas e o quarto valor mais alto para as médias diárias (permitindo verificar se o valor limite diário do Decreto-Lei Nº 111/2002 foi excedido mais de 3 vezes no ano). Foram ainda obtidas tabelas com os 25 valores mais elevados para as médias horárias e diárias.

Para os receptores discretos foram produzidos ficheiros com as médias horárias e diárias, para todo o ano, por receptor discreto (ficheiro *postfile*), para análise posterior. O AERMOD forneceu, ainda, ficheiros com as 100 concentrações mais altas, obtidos por ordenação decrescente das concentrações máximas em cada data, para o conjunto dos receptores discretos (*rankfile*); estes ficheiros são usados para gerar gráficos de resultados quantil-quantil (Q-Q), em que os resultados de modelos diferentes e de observações de qualidade do ar, ordenados de forma decrescente, são comparados graficamente.

Para a malha de receptores foram obtidos ficheiros com todas as ocorrências relativas à violação de um limiar, correspondente ao valor limite da legislação ( $350 \mu\text{g.m}^{-3}$  para as médias horárias e  $125 \mu\text{g.m}^{-3}$  para as médias diárias). Foram também gerados ficheiros das primeiras e segundas concentrações mais altas de médias horárias e diárias e, ainda, da média anual, por ponto de coordenadas  $(x,y)$ , para criar gráficos de isolinhas de concentração.

## 5.2 Resultados obtidos

Tendo por base as condições de simulação descritas anteriormente, foram aplicados os modelos ISCST3 e AERMOD. Os resultados obtidos são discutidos neste capítulo.

### 5.2.1 Influência dos parâmetros superficiais no AERMOD

Apresentam-se, seguidamente, os resultados obtidos nas simulações levadas a cabo com o AERMOD, em que se fizeram variar os parâmetros relacionados com as características superficiais –  $z_0$ ,  $\beta_0$  e  $r'$  –, tendo em vista analisar a sua influência nos valores estimados. As condições de simulação foram descritas em 5.1.4.

No Quadro 15 resumem-se as condições simuladas e os resultados obtidos nos receptores correspondentes às estações da RMQA. Neste quadro incluem-se, ainda, os valores medidos nas estações da RMQA, para efeitos comparativos, bem como os resultados obtidos por aplicação do ISCST3. No sentido de facilitar a análise, os valores máximos horários simulados e medidos encontram-se representados na Figura 35. A mesma representação é feita para os valores máximos diários na Figura 36. As linhas representadas nas figuras, que unem os pontos de algumas das séries, são linhas auxiliares e não representam continuidade entre pontos.



5. APLICAÇÃO DOS MODELOS

Quadro 15 – Comparação dos resultados do AERMOD, obtidos por variação dos parâmetros superficiais, com os valores medidos nas estações da RMQA e simulados pelo ISCST3

Simulação	Condições de simulação	Abrantes			Pego			Mouriscas			Mação			Gavião			S. Facundo		
		Max. 1 h	Max. 24 h	Ano	Max. 1 h	Max. 24 h	Ano	Max. 1 h	Max. 24 h	Ano	Max. 1 h	Max. 24 h	Ano	Max. 1 h	Max. 24 h	Ano	Max. 1 h	Max. 24 h	Ano
1	$z_0=0,05$ m; $Bo=0,5$ ; $r'=0,2$ ; min MH=100 m	165,0	11,4	1,3	190,4	24,6	3,2	159,2	14,3	1,2	91,8	10,1	1,1	86,9	7,3	1,2	136,8	7,5	0,3
2	$z_0=0,1$ m; $Bo=0,1$ ; $r'=0,2$ ; min MH=5 m	163,0	10,5	0,9	154,6	19,7	2,0	162,8	11,5	0,8	91,1	8,7	0,8	109,0	6,9	1,0	146,4	9,1	0,3
3	$z_0=0,1$ m; $Bo=0,3$ ; $r'=0,2$ ; min MH=5 m	154,4	10,8	1,1	174,0	24,0	2,9	176,3	12,1	1,1	93,9	8,7	1,0	88,4	6,2	1,1	35,2	7,5	0,3
4	$z_0=0,1$ m; $Bo=0,5$ ; $r'=0,2$ ; min MH=5 m	157,9	11,0	1,2	172,8	24,9	3,2	171,0	11,9	1,2	94,9	8,8	1,0	79,8	6,4	1,2	127,2	6,8	0,3
5	$z_0=0,1$ m; $Bo=2,0$ ; $r'=0,2$ ; min MH=5 m	164,9	10,6	1,3	155,1	25,2	3,7	166,9	13,8	1,3	92,2	8,6	1,0	64,0	6,6	1,2	112,1	5,8	0,3
6	$z_0=0,2$ m; $Bo=0,5$ ; $r'=0,2$ ; min MH=100 m	53,0	2,3	0,1	11,7	0,5	0,0	52,1	2,9	0,1	43,7	4,4	0,3	48,3	2,8	0,2	40,6	2,2	0,1
7	$z_0=0,2$ m; $Bo=0,5$ ; $r'=0,2$ ; min MH=5 m	139,2	9,8	1,0	156,1	25,2	3,2	153,8	10,0	1,1	91,0	7,3	0,9	70,1	5,9	1,1	116,0	6,4	0,3
8	$z_0=0,5$ m; $Bo=0,5$ ; $r'=0,2$ ; min MH=100 m	88,8	6,8	0,8	128,1	25,9	3,2	116,6	8,4	0,9	71,2	5,9	0,8	60,6	6,2	1,0	95,7	5,4	0,2
9	$z_0=1,3$ m; $Bo=0,5$ ; $r'=0,2$ ; min MH=100 m	76,9	7,3	0,8	116,8	37,2	3,2	64,3	7,4	0,7	38,2	5,0	0,9	43,2	7,1	1,0	71,8	3,6	0,2
10	$z_0$ e $Bo$ variáveis*, $r'=0,15$	149,3	8,6	0,8	142,2	25,5	2,9	126,4	9,2	1,0	84,7	6,0	0,8	96,4	6,2	0,9	86,7	5,0	0,2
11	$z_0$ e $Bo$ variáveis**, $r'=0,12$	146,7	8,8	0,8	129,6	24,8	2,8	126,2	9,1	1,0	83,5	5,9	0,8	94,6	6,1	0,9	85,1	5,0	0,2
12	Final- $z_0$ e $Bo$ variáveis***, $r'=0,12$	146,7	8,9	0,8	129,6	24,9	2,8	126,2	9,1	1,0	88,4	6,0	0,8	94,6	6,1	0,9	85,1	5,9	0,2
13	Pego - $z_0$ , $Bo$ e $r'$ variáveis****	127,8	8,2	1,0	140,2	25,3	3,4	118,1	9,3	1,0	86,3	6,4	0,8	55,1	6,5	1,1	103,0	5,7	0,3
ISCST3		122,2	14,3	0,6	249,7	21,4	1,2	176,3	15,9	0,6	71,3	10,0	1,2	109,7	34,7	3,6	93,8	3,9	0,1
RMQA (valores medidos)		142,8	45,0	13,8	113,5	22,7	8,6	121,2	33,9	14,2	161,4	28,1	8,6	92,5	25,8	9,0	89,8	26,0	12,8

\*, \*\*, \*\*\*, \*\*\*\* - os valores assumidos pelos parâmetros superficiais apresentam-se no Quadro 16.

Quadro 16 – Valores dos parâmetros superficiais correspondentes às simulações 10 a 12 e “Pego”, do Quadro 15.

Sectores (°)		Largura (°)	Caso 10*			Caso 11**			Caso 12 ***			Pego ***		
Início	Fim		$r'(\phi)$	$\beta_0$	$z_0$	$r'(\phi)$	$\beta_0$	$z_0$	$r'(\phi)$	$\beta_0$	$z_0$	$r'(\phi)$	$\beta_0$	$z_0$
330	50	80	0,15	1,00	0,70	0,12	1,00	0,70	0,12	1,00	0,70	0,12-0,13	0,6-0,7	0,2-0,3
50	80	30	0,15	0,50	0,10	0,12	0,50	0,10	0,12	0,30	0,10	0,12-0,13	0,6-0,7	0,2-0,3
80	120	40	0,15	0,10	0,05	0,12	0,10	0,05	0,12	0,10	0,05	0,12	0,6	0,3
120	150	30	0,15	0,50	0,10	0,12	0,50	0,10	0,12	0,50	0,10	0,12	0,7	0,4
150	225	75	0,15	1,00	0,30	0,12	1,00	0,30	0,12	1,00	0,30	0,13-0,15	0,6-0,9	0,2-0,5
225	260	35	0,15	0,50	0,20	0,12	0,50	0,20	0,12	0,70	0,10	0,15-0,18	0,6-0,7	0,2-0,5
260	300	40	0,15	0,10	0,10	0,12	0,10	0,10	0,12	0,10	0,10	0,14-0,18	0,6-0,7	0,5
300	330	30	0,15	0,30	0,20	0,12	0,30	0,20	0,12	0,30	0,20	0,12	0,6	0,30

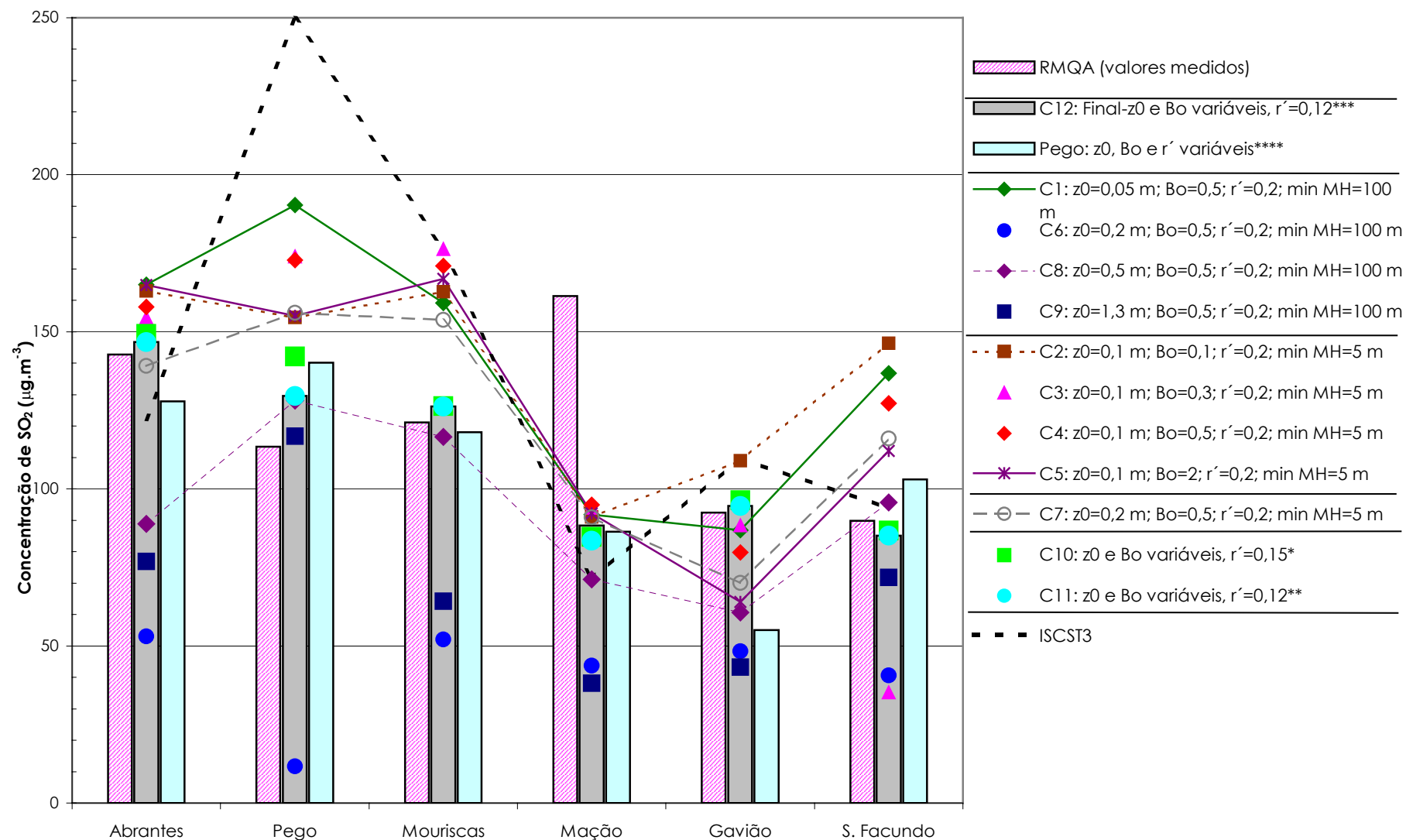


Figura 35 – Valores máximos médios horários simulados pelo AERMOD para diferentes valores de rugosidade ( $z_0$ ), razão de Bowen ( $\beta_o$ ) e albedo ( $r'$ ).

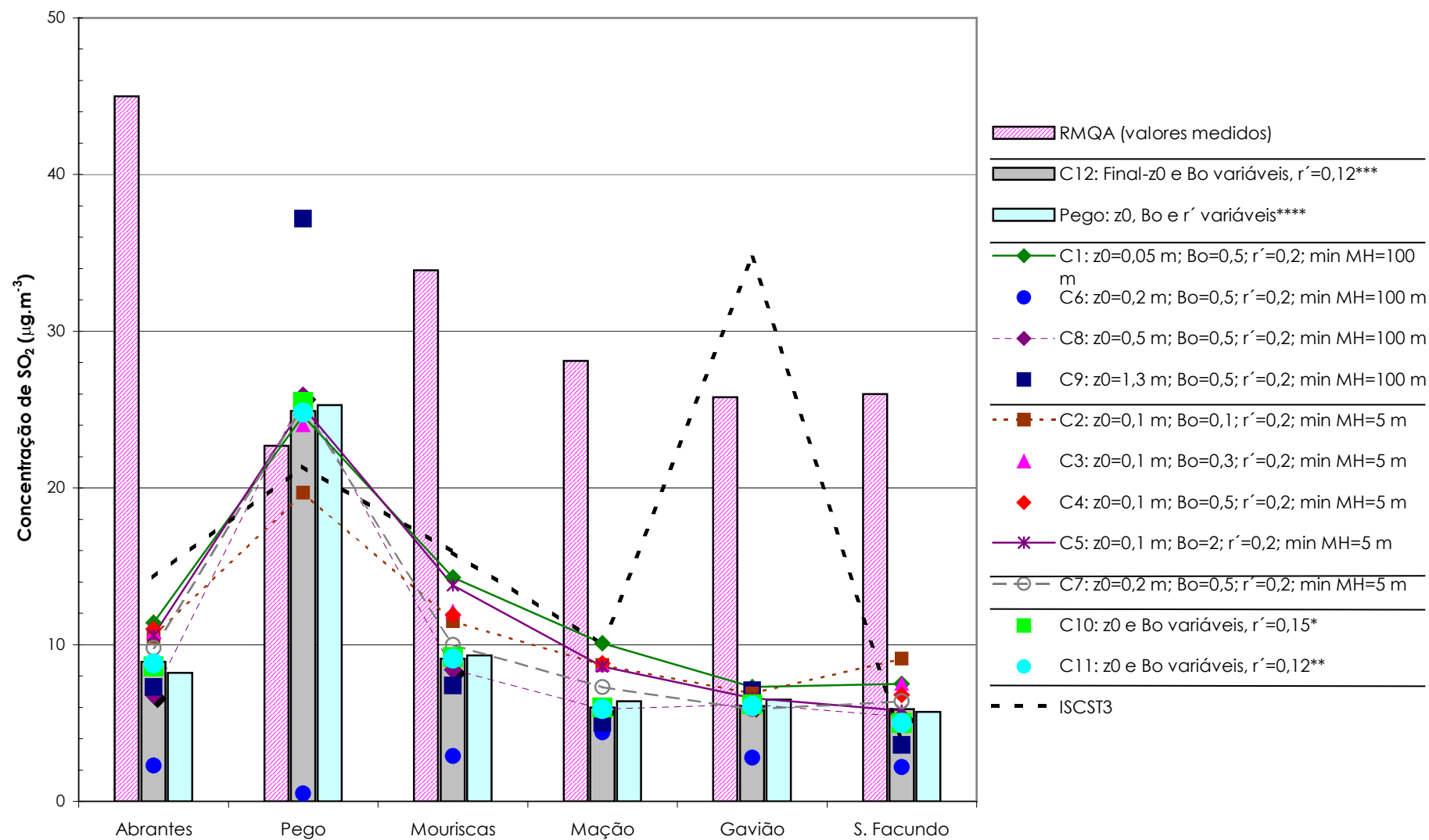


Figura 36 – Valores máximos médios diários simulados pelo AERMOD para diferentes valores de rugosidade ( $z_0$ ), razão de Bowen ( $\beta_0$ ) e albedo ( $r'$ ).



A primeira série ("RMQA") indicada no topo das legendas da Figura 35 e da Figura 36 diz respeito aos valores medidos. A simulação C12 (Final) corresponde ao melhor ajuste obtido na análise de sensibilidade; a simulação seguinte, "Pego", é a representativa do uso do solo na região da Central do Pego. As quatro simulações que se seguem na legenda – C1, C6, C8 e C9 – estão ordenadas por ordem crescente de rugosidade, de 0,05 a 1,3 m; nas simulações C2 a C5, o parâmetro  $\beta_0$  cresce de 0,1 a 2. Finalmente, nas simulações C10 e C11 foi variado  $r'$ , de 0,15 para 0,12.

A influência de  $z_0$  nos valores obtidos - C1(♦), C6(●), C8(◆) e C9(■) - é muito marcada. No entanto, a resposta do modelo à variação experimentada não é linear e a amplitude de variação dos valores estimados difere consoante a estação, sendo maior no Pego, a estação mais próxima, e menor em Mação e no Gavião, as mais distantes. Comparando o intervalo de concentrações obtido em cada estação ao variar a rugosidade entre 0,05 e 1,3, conclui-se que a concentração máxima obtida é cerca de 16 vezes maior do que a mínima no Pego, 3 vezes maior nas estações de Abrantes, Mouriscas e S. Facundo e 2 vezes maior em Mação e Gavião. Para  $z_0=0,05$ , o valor simulado é consideravelmente mais alto em todas as estações.

Relativamente à amplitude verificada no Pego, ao tratar-se de uma estação próxima da Central, a uma cota semelhante à da base das chaminés, as concentrações mais altas poderão resultar do efeito de correntes convectivas verticais que transportam o penacho para o solo; nestas condições, é compreensível que a influência dos parâmetros em análise, que influenciam a turbulência atmosférica, seja tão marcada nesta estação. Salienta-se que no Pego o ISCST3 simula um valor cerca de 2,5 vezes superior ao medido.

A amplitude observada nas simulações C2(■), C3(▲), C4(◆) e C5(✱), por variação de  $\beta_0$ , é menos expressiva do que no caso de  $z_0$ , à excepção do Gavião e, principalmente, de S. Facundo, em que a razão entre as concentrações máxima e mínima simuladas é próxima de 2 e 4, respectivamente.

Comparando as simulações C6(●) e C7(○), em que se analisa a influência de alterar o limite inferior de  $z_i$  de 100 para 5 m, em condições idênticas restantes, verifica-se um acréscimo muito importante das concentrações; por este motivo, não podem ser comparadas entre si as simulações em que este valor mínimo não se manteve constante.

A amplitude da variação de  $r'$  que foi analisada nas simulações C10(■) e C11(●), entre 0,15 e 0,12, é muito pequena e não teve reflexos nas concentrações estimadas, à excepção do Pego.

Na estação de Mação, nenhum dos valores estimados se aproxima do valor medido; no entanto, é de referir que a concentração mais alta medida nesta estação ( $161 \mu\text{g.m}^{-3}$ ) é muito maior do que o segundo valor mais alto medido ( $58 \mu\text{g.m}^{-3}$ ); a maioria dos valores estimados pelo AERMOD aproxima-se mais deste segundo valor. Tal como em Mação, a concentração máxima observada nas Mouriscas ( $121 \mu\text{g.m}^{-3}$ ) é muito superior ao segundo valor medido ( $61 \mu\text{g.m}^{-3}$ ); ao contrário de Mação, neste caso os valores máximos horários simulados aproximam-se mais do máximo

medido, embora o intervalo de variação seja significativo, entre valores da ordem do segundo maior valor medido e cerca de 50% acima do primeiro maior valor.

A série C12, designada por “Final”, resultou da selecção de diferentes valores de  $z_0$ ,  $\beta_0$  e  $r'$  para 8 sectores de direcção do vento, procurando ajustar as concentrações máximas estimadas pelo AERMOD, tanto quanto possível, aos valores máximos medidos na RMQA. Apesar de os valores simulados e medidos serem razoavelmente concordantes, em termos de picos horários, os valores atribuídos aos parâmetros nalguns sectores não estão de acordo com as características de uso do solo (tendo como base os valores de referência tabelados no Manual do AERMET). Por este motivo, optou-se por caracterizar o uso do solo na envolvente da Central, com base em fotografias aéreas e cartas militares, procurando atribuir aos parâmetros superficiais valores representativos dos usos observados. A série de valores horários, obtida desta forma, foi designada por “Pego”.

A série “Pego” aproxima-se razoavelmente dos valores máximos medidos na RMQA, à excepção da estação do Gavião (valor simulado e medido de, respectivamente, 55 e 93  $\mu\text{g.m}^{-3}$ ). As concentrações simuladas pelo AERMOD nesta estação são influenciadas pelos valores dos parâmetros superficiais atribuídos aos sectores a montante (Oeste da Central). Estendendo a área de caracterização do uso do solo, para os sectores 240° a 300°, até cerca de 7,5 km da Central, englobando uma área, entre 3 e 7,5 km, constituída essencialmente por solo agrícola e uma pequena fracção por água, o valor máximo horário simulado no Gavião é de 72  $\mu\text{g.m}^{-3}$ . Salienta-se que, a uma distância superior a 3 km para Oeste da Central, a rugosidade do terreno é efectivamente menor, coincidindo com as margens planas do Tejo e área cultivadas (Figura 37).



Figura 37 – Uso do solo a Oeste da Central do Pego: série de fotografias obtidas no Castelo de Abrantes, do lado nascente (em cima) e Sul (em baixo)

Tratando-se de uma fonte elevada, com uma área de influência de vários quilómetros, pode questionar-se se a área a considerar na definição dos parâmetros superficiais deverá estar limitada a um raio de 3 km da fonte, de acordo com o recomendado pela U.S. EPA, independentemente das características da fonte (altura e tipo de penacho).

O valor máximo simulado aproximar-se-ia ainda mais do valor máximo medido para valores inferiores de  $z_0$  (0,05 m) e de  $\beta_0$  (0,3) – mas estes valores são excessivamente baixos para as características dos sectores em causa.

A mesma análise foi feita para os valores médios diários (Figura 38). Comparando os cenários de rugosidade variável C1(♦), C6(●), C8(◆) e C9(■), o quociente entre o valor máximo e o mínimo simulados nos quatro casos é de cerca de 2 em Mação, 3 no Gavião e S. Facundo, 5 em Abrantes e Mouriscas e 74 no Pego – ou seja, a dispersão dos valores simulados é maior para as estações mais próximas. No que diz respeito a  $\beta_0$ , a dispersão é menor; o maior valor entre o máximo e o mínimo simulados é da ordem de 1,5, na estação de S. Facundo.

Os valores máximos médios diários medidos na RMQA são muito maiores do que os simulados – à excepção do Pego –, sendo a magnitude dessas diferenças muito superior às variações verificadas devido aos parâmetros superficiais.

Conclui-se, assim, que o AERMOD se mostra sensível à variação de  $z_0$  e de  $\beta_0$  (principalmente o primeiro), em termos de valores médios horários. A relação verificada entre a variação dos parâmetros e os valores simulados não é linear. Relativamente a  $r'$ , foram feitas apenas duas simulações, não sendo possível retirar conclusões sobre a influência deste parâmetro.

## 5.2.2 Comparação das estimativas dos modelos na área de estudo

No capítulo anterior foram analisados os resultados do ISCST3 e do AERMOD para os receptores localizados nas estações da RMQA. No presente capítulo, a análise estende-se a toda a região abrangida pela malha de receptores identificada em 4.2.1. O AERMOD foi aplicado nas condições de simulação do cenário C12.

No Quadro 17 apresentam-se os resultados da aplicação dos modelos. Os resultados apresentados são a primeira, segunda e a décima concentração mais alta – horária, diária e anual – e, ainda, a quarta mais alta diária, em todo o domínio de simulação. Indica-se, ainda, o número máximo estimado de violações do valor limite num mesmo receptor. Os resultados obtidos são comparados com os valores limite correspondentes, definidos na legislação em vigor (Decreto-Lei nº 111/2002).

Quadro 17 – Resultados da aplicação dos modelos AERMOD e ISCST3

Concentrações de SO <sub>2</sub> no domínio de simulação		Legislação em vigor	ISCST3		AERMOD	
Horárias			( $\mu\text{g.m}^{-3}$ )	Ocorrência	( $\mu\text{g.m}^{-3}$ )	Ocorrência
	1 <sup>a</sup>		495,2	13-Fev, 21h	574,3	11-Ago, 7h
	2 <sup>a</sup>		494,1	03-Mar, 22h	488,2	23-Nov, 18h
	10 <sup>a</sup>		462,9	13-Ago, 5h	374,7	14-Dez, 17h
Nº máximo de vezes em que é excedido o valor limite horário para protecção da saúde humana (350 $\mu\text{g.m}^{-3}$ )		O valor limite de 350 $\mu\text{g.m}^{-3}$ não deve ser ultrapassado mais de 24 vezes em cada ano civil	<b>56 vezes</b>		3 vezes	
Diárias			( $\mu\text{g.m}^{-3}$ )	Ocorrência	( $\mu\text{g.m}^{-3}$ )	Ocorrência
	1 <sup>a</sup>		68,6	31-Ago	52,1	31-Ago
	2 <sup>a</sup>		65,4	11-Ago	34,2	13-Ago
	4 <sup>a</sup>		59,0	11-Ago	29,0	14-Out
	10 <sup>a</sup>		57,1	20-Out	25,2	27-Mai
Nº máximo de vezes em que é excedido o valor limite diário para protecção da saúde humana (125 $\mu\text{g.m}^{-3}$ )		O valor limite de 125 $\mu\text{g.m}^{-3}$ não deve ser ultrapassado mais de 3 vezes em cada ano civil	0 vezes		0 vezes	
Anuais			( $\mu\text{g.m}^{-3}$ )		( $\mu\text{g.m}^{-3}$ )	
	1 <sup>a</sup>	20 $\mu\text{g.m}^{-3}$ (Valor limite	10,4		3,8	
	2 <sup>a</sup>	anual para protecção dos	10,1	-	3,4	-
	10 <sup>a</sup>	ecossistemas)	6,2		3,2	

No que respeita às concentrações médias horárias, os dez maiores valores simulados pelos dois modelos são superiores ao valor limite horário definido no Decreto-Lei nº 111/2002, sendo os valores simulados da mesma ordem de grandeza; no entanto, a série de máximos do AERMOD

decrece mais rapidamente do que a do ISCST3, do primeiro valor mais alto para o décimo mais alto. De acordo com as estimativas do ISCST3, o valor limite é excedido mais do que 24 vezes no ano, no domínio de simulação; o AERMOD prevê um número máximo de 3 ultrapassagens.

No Quadro 17 apresenta-se o número de valores horários acima do valor-limite de  $350 \mu\text{g.m}^{-3}$  por receptor, além das coordenadas e cotas respectivas.

Quadro 18 – Número de ultrapassagens do valor limite horário, por receptor, estimado pelos modelos

ISCST3			AERMOD			
Nº valores > $350 \mu\text{g.m}^{-3}$	Coordenadas (m)	Cota (m)	Nº valores > $350 \mu\text{g.m}^{-3}$	Coordenadas (m)	Cota (m)	Altura de escala $h_c$ (m)
56	580500 E, 4379500 N	329	3	586500 E, 4385500 N	425	640
21	579500 E, 4385500 N	400	2	583500 E, 4385500 N	470	590
15	582500 E, 4385500 N	400	1	579500 E, 4383500 N	420	420
10	583500 E, 4387500 N	395	1	579500 E, 4384500 N	420	435
9	589500 E, 4384500 N	370	1	583500 E, 4388500 N	415	610
6	591500 E, 4381500 N	407	1	587500 E, 4387500 N	485	590
5	576500 E, 4382500 N	336	1	590500 E, 4385500 N	405	624
5	576500 E, 4384500 N	324	1	590500 E, 4386500 N	410	624
5	579500 E, 4384500 N	420	1	591500 E, 4381500 N	407	407
2	576500 E, 4388500 N	350				
2	577500 E, 4370500 N	65				
2	590500 E, 4385500 N	405				
1	575500 E, 4368500 N	107				
1	576500 E, 4370500 N	39				
1	579500 E, 4383500 N	420				
1	583500 E, 4388500 N	415				
$\Sigma = 142$		81% > 320	$\Sigma = 12$		> 400	

De acordo com o estimado pelo ISCST3, apenas num receptor terá ocorrido violação do valor limite mais do que 24 vezes no ano (56 ultrapassagens). Este receptor está situado a Norte da Central, a uma distância de cerca de 10 km e a 329 m de altitude. A maioria dos receptores com valores máximos horários superiores a  $350 \mu\text{g.m}^{-3}$  situa-se a mais de 320 m de altitude; exceptuam-se 3 pontos, 2 a Norte e 1 a Sudoeste da Central, bastante próximos desta (a menos de 1,5 km). Das 142 horas com valores estimados superiores a  $350 \mu\text{g.m}^{-3}$ , 137 corresponderam a condições atmosféricas muito estáveis (classe “F” de Pasquill-Gifford) e, num só caso, estáveis (classe “E”); as ocorrências referidas anteriormente verificadas nos 3 pontos relativamente próximos da Central tiveram na sua origem condições de forte instabilidade (classe “A” de Pasquill-Gifford).

O AERMOD estima, em geral, valores mais baixos – apesar de a concentração máxima ser maior do que a estimada pelo ISCST3. A ocorrência de valores acima do valor limite foi estimada apenas em 12 horas no ano, e em 9 receptores, dos quais apenas num receptor este valor limite é excedido em mais do que 1 hora no ano (3 horas). Todos os 9 receptores têm cotas de terreno superiores a 400 m, sendo alguns deles influenciados, de acordo com a leitura feita pelo AERMOD, pelo terreno mais acidentado existente a Nordeste do domínio de aplicação do AERMAP, com altitudes da ordem dos 600 m – como indicado pelos valores da altura de escala

(*hill height*) apresentados no quadro anterior. É de salientar que as 12 horas de ocorrência de concentrações superiores ao valor limite coincidem com os períodos de transição da noite para o dia ou vice-versa, em condições de estabilidade atmosférica, com valores de comprimento de Obukhov pequenos e positivos (entre 6 e 11 m) - correspondentes à classe de estabilidade “F” de Pasquill-Gifford -, seguidas ou precedidas, consoante o período, de horas com valores de  $L$  negativos. A altura da camada de mistura nestas 12 horas variou entre 374 e 822 m; o vento soprou de sudoeste (entre 190 e 230°). Na maioria dos receptores em causa os valores de altura de escala  $h_c$  são altos, próximos ou maiores do que 600 m. Os máximos estimados deverão corresponder a situações em que a concentração é determinada apenas, ou principalmente, pela componente horizontal descrita em 3.3.4 – que simula a tendência de um penacho que se encontre abaixo de  $H_c$  para contornar a colina ou colidir contra ela em situações de forte estabilidade.

Ainda com base no AERMOD, ao contrário do ISCST3, não é expectável a ocorrência de valores superiores a  $350 \mu\text{g.m}^{-3}$  em condições de instabilidade atmosférica.

A distribuição espacial dos valores máximos horários de concentração de  $\text{SO}_2$ , estimada por cada um dos modelos, é apresentada na Figura 38, relativa ao ISCST3, e na Figura 39, relativa ao AERMOD. Nestas figuras estão representadas as isolinhas dos valores máximos horários de concentração. Na escala da figura está indicado o valor limite horário,  $350 \mu\text{g.m}^{-3}$ , definido no Decreto-Lei nº111/2002.



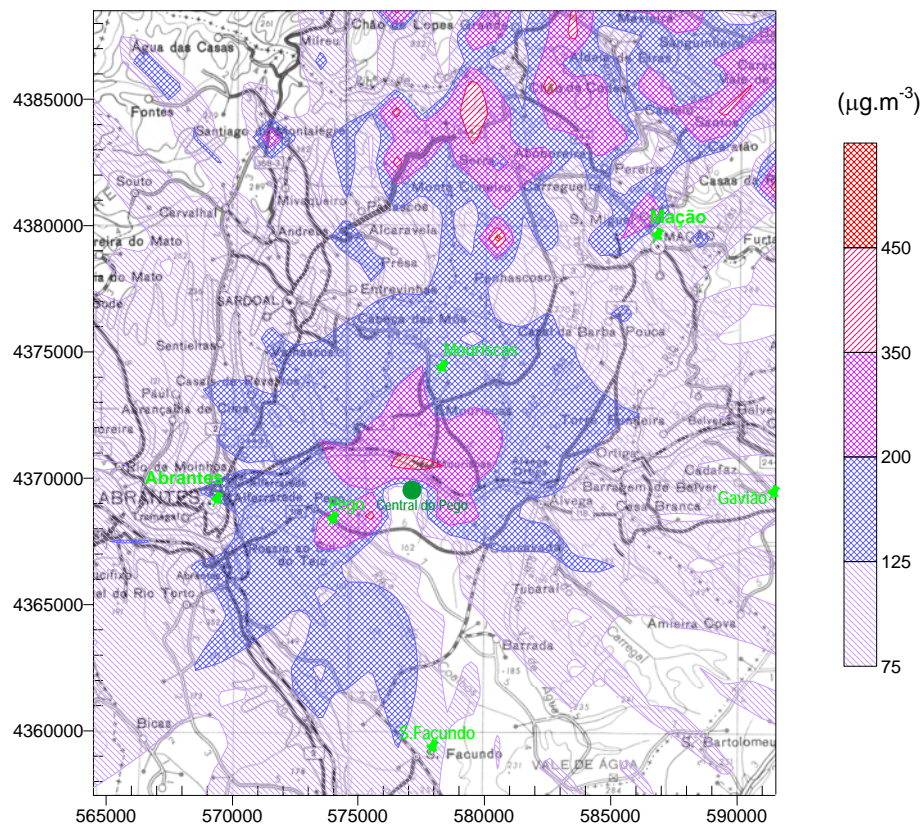


Figura 38 – Concentração máxima média horária de  $\text{SO}_2$  ( $\mu\text{g.m}^{-3}$ ) estimada pelo ISCST3

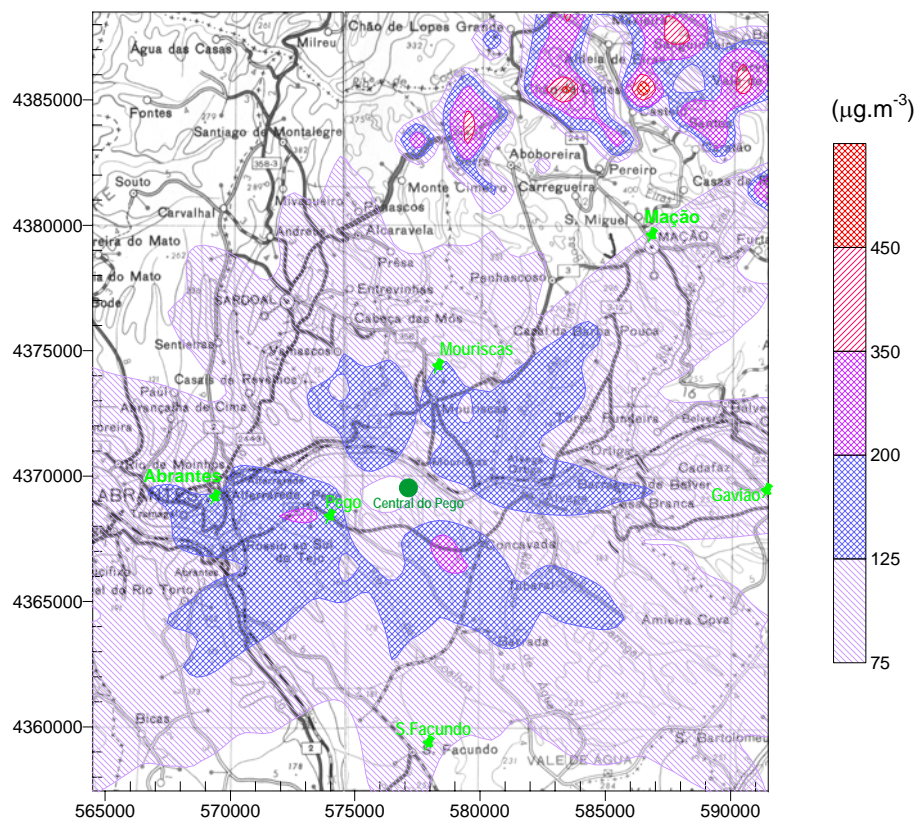


Figura 39 – Concentração máxima média horária de  $\text{SO}_2$  ( $\mu\text{g.m}^{-3}$ ) estimada pelo AERMOD

No caso do AERMOD, observam-se valores de concentração superiores a  $200 \mu\text{g.m}^{-3}$  em áreas de cotas superiores a 400 m de altitude. Por comparação das duas figuras anteriores, verifica-se que a área total abrangida por concentrações superiores a  $200 \mu\text{g.m}^{-3}$  é maior no caso do ISCST3, estendendo-se a altitudes superiores a 300 m, a Norte do domínio, e abrangendo, ainda, uma área relativamente extensa na envolvente Norte, Oeste e Este da Central, onde se estimam concentrações horárias superiores ao limite de  $350 \mu\text{g.m}^{-3}$ , como referido anteriormente. Nesta zona envolvente da Central, considerando uma área de cerca de 5 km de raio, os resultados dos dois modelos diferem significativamente: o ISCST3 estima concentrações mais altas e a menores distâncias da Central.

Os dois modelos estimam concentrações superiores ao valor limite horário de  $350 \mu\text{g.m}^{-3}$  a cerca de 15 km a Norte-Nordeste da Central, na zona da Serra da Amêndoa. A Figura 39 sugere a possibilidade de ocorrência de concentrações superiores a  $350 \mu\text{g.m}^{-3}$  para lá do domínio simulado, na direcção Norte e, possivelmente, Este, a distâncias da Central de cerca de 20 km. Para distâncias desta ordem, a incerteza associada aos resultados aumenta, razão pela qual estes resultados não são considerados conclusivos, aconselhando o recurso a modelos de transporte a maior distância.

A Figura 40 mostra a distribuição espacial do segundo valor horário mais alto estimado em cada receptor pelos dois modelos.

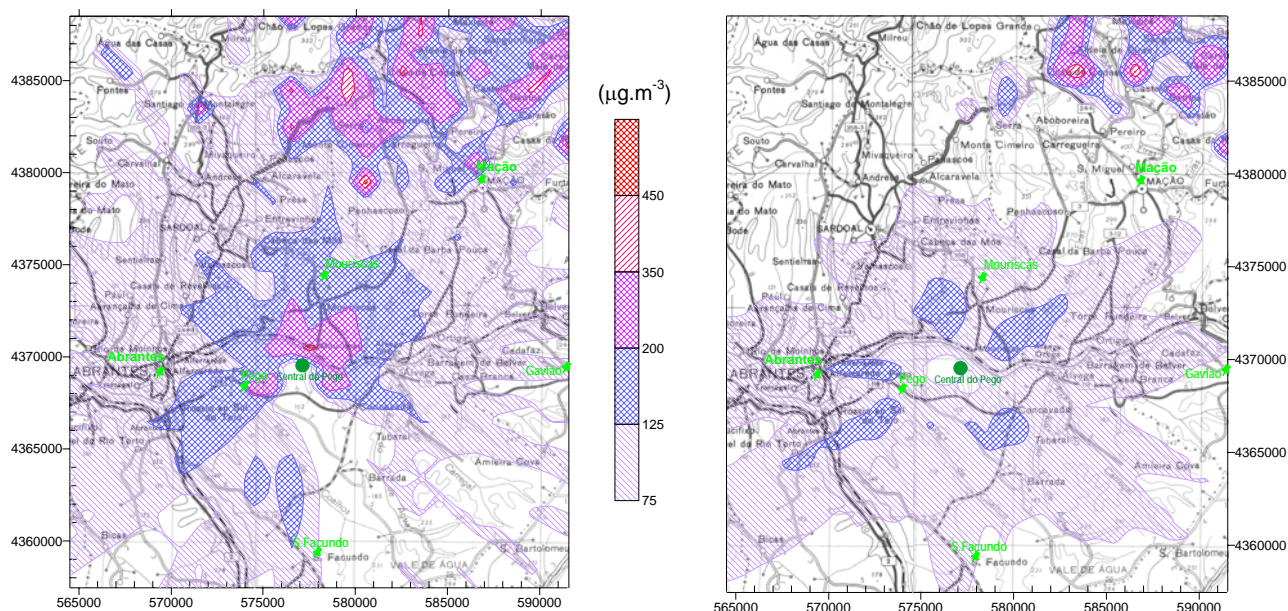


Figura 40 – Segunda concentração média horária de  $\text{SO}_2$  ( $\mu\text{g.m}^{-3}$ ) mais alta estimada pelo ISCST3 (esquerda) e pelo AERMOD (direita)

No caso do AERMOD, a área com concentrações esperadas superiores a  $125 \mu\text{g.m}^{-3}$  é bastante inferior à da distribuição do primeiro valor mais alto, mantendo-se uma pequena área a Nordeste



do domínio com concentrações acima de  $200 \mu\text{g.m}^{-3}$ , onde ainda é prevista a ultrapassagem do valor limite. As diferenças observadas entre o primeiro e o segundo valores mais altos são menos expressivas no caso do ISCST3.

A Figura 41 mostra a distribuição espacial da 25ª concentração mais alta estimada em cada receptor por ambos modelos. Dado que a legislação admite um número de ultrapassagens do valor limite horário não superior a 24, a análise da 25ª concentração mais alta permite identificar as áreas em que se estima que o número de ultrapassagens seja maior do que o máximo estabelecido.

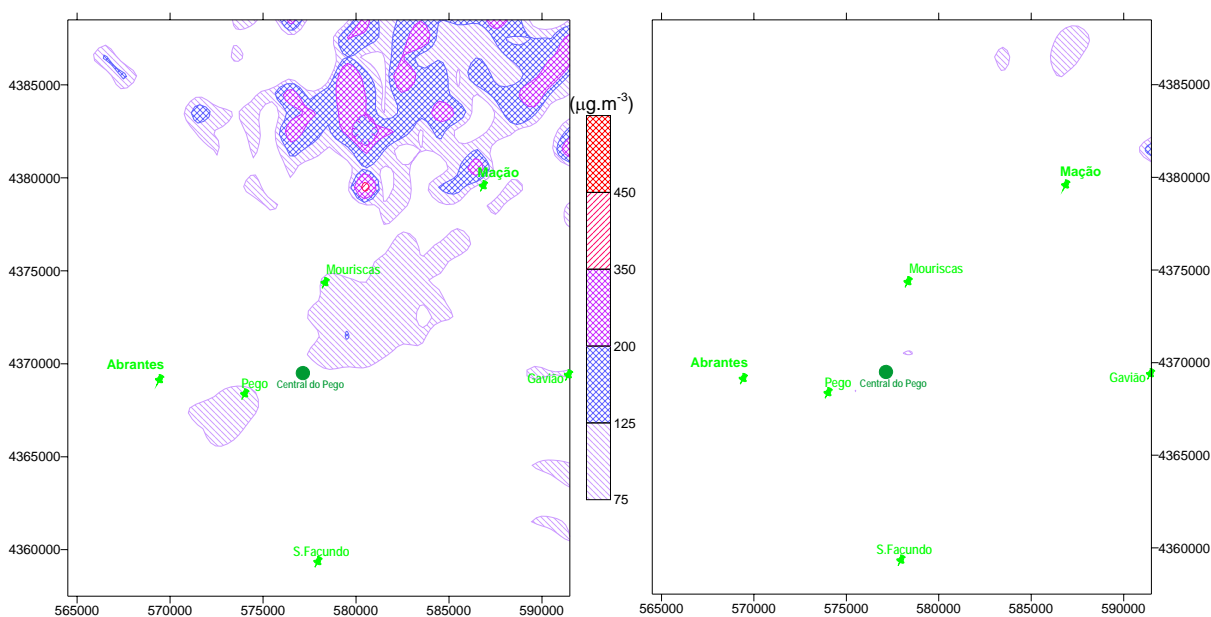


Figura 41 – 25ª concentração máxima média horária de  $\text{SO}_2$  ( $\mu\text{g.m}^{-3}$ ), estimada pelo ISCST3 (esquerda) e pelo AERMOD (direita)

A localização do receptor para o qual o ISCST3 estima que se exceda o valor limite mais do que 24 vezes no ano (56 ultrapassagens), como indicado no Quadro 18, é visível na figura da esquerda, correspondente à pequena mancha vermelha a Oeste de Mação. O ISCST3 estima concentrações maiores do que o AERMOD próximo da Central e, como seria de esperar devido à orografia complexa, a Norte e Nordeste da área de simulação. A 25ª concentração mais alta estimada pelo AERMOD, no conjunto dos receptores considerados, é equivalente a  $178 \mu\text{g.m}^{-3}$ , não sendo de esperar, por esta razão, que o valor limite seja violado na região considerada, mesmo considerando o factor de incerteza de 2 geralmente atribuído aos modelos Gaussianos clássicos, como o ISCST3. Os valores mais altos obtidos com o AERMOD, superiores a  $125 \mu\text{g.m}^{-3}$ , são esperados junto ao limite Nordeste da área simulada, estendendo-se, previsivelmente, para além deste limite.

Relativamente aos valores médios diários – Figura 42 e Figura 43 –, os valores estimados são bastante inferiores ao valor limite legislado ( $125 \mu\text{g.m}^{-3}$ ). Observa-se que o ISCST3 sobrestima as concentrações relativamente ao AERMOD. As localizações dos máximos diários e horários

simulados é semelhante em cada modelo, embora para o ISCST3 se note uma zona a Sudeste proporcionalmente mais afectada em termos de máximos diários, do que horários.

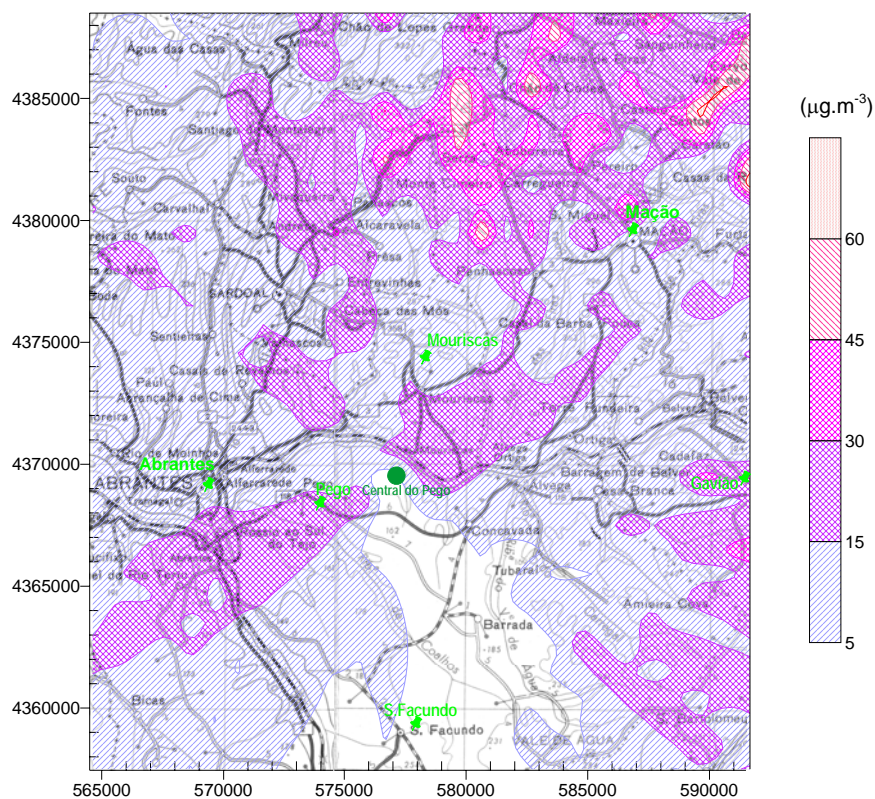


Figura 42 – Concentração máxima média diária de  $\text{SO}_2$  ( $\mu\text{g.m}^{-3}$ ) estimada pelo ISCST3.

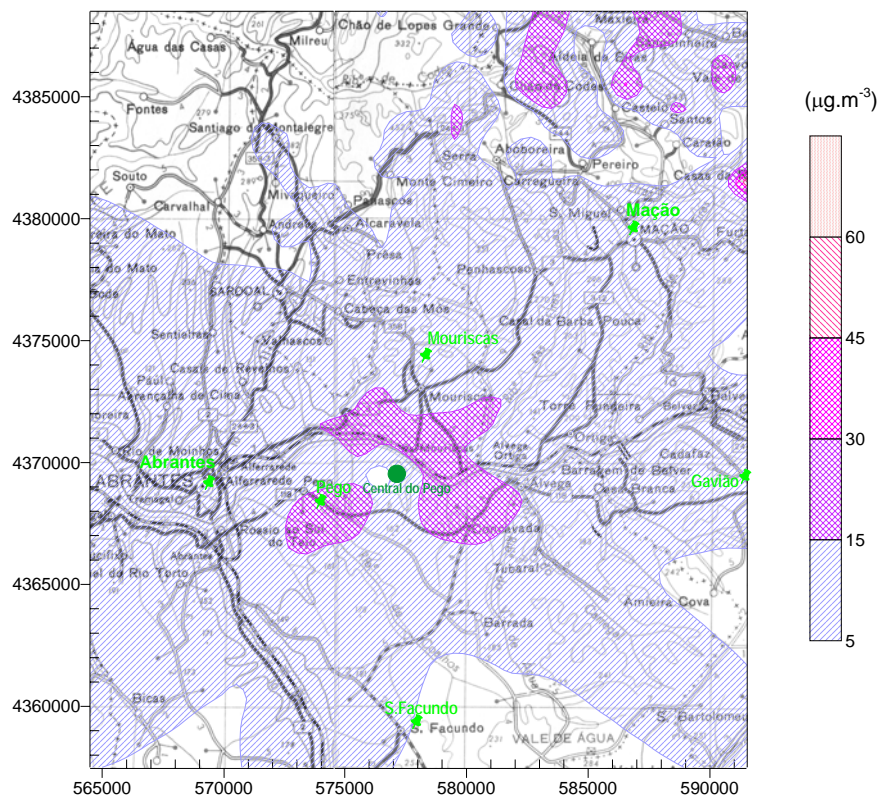


Figura 43 – Concentração máxima média diária de  $\text{SO}_2$  ( $\mu\text{g.m}^{-3}$ ) estimada pelo AERMOD.

Os valores médios anuais simulados pelos dois modelos estão representados na Figura 44 (ISCST3) e Figura 45 (AERMOD).

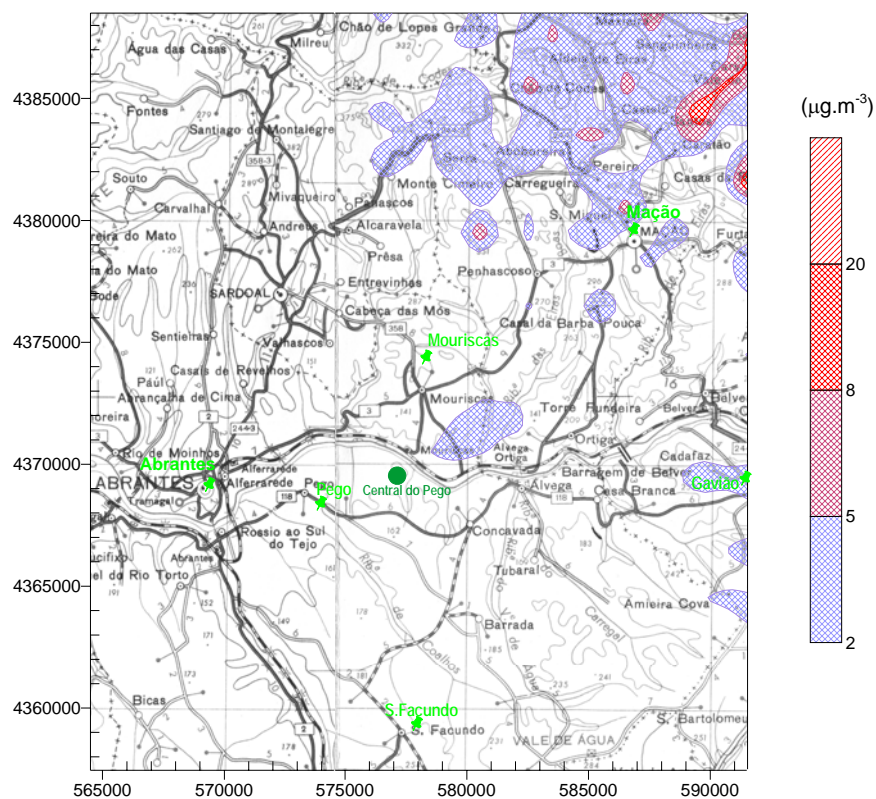


Figura 44 – Concentração média anual de  $\text{SO}_2$  ( $\mu\text{g.m}^{-3}$ ) estimada pelo ISCST3.

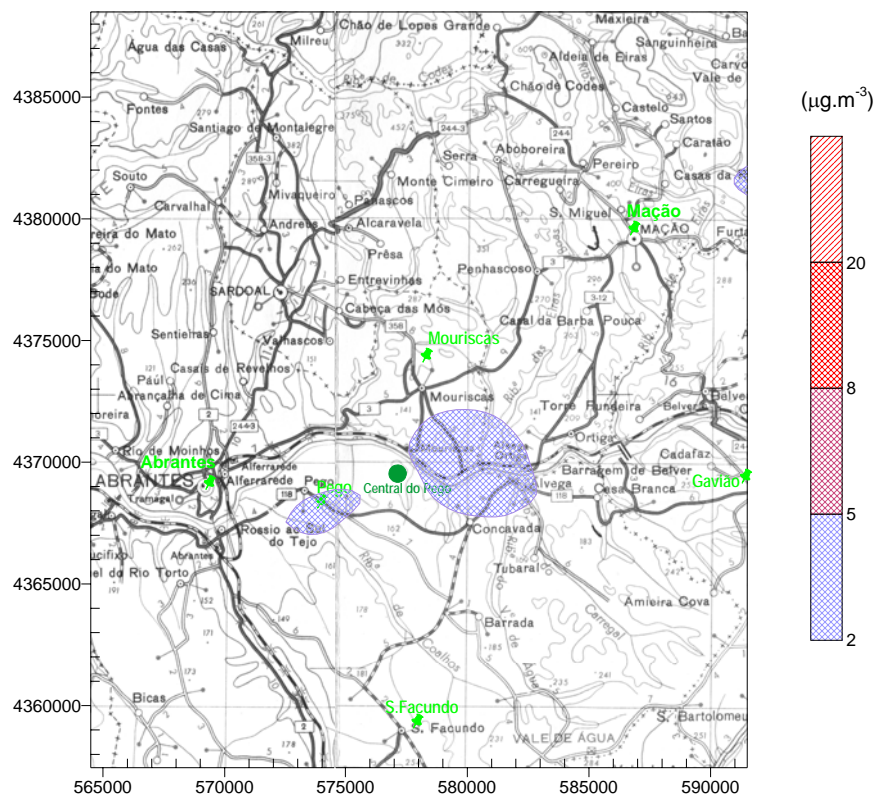


Figura 45 – Concentração média anual de  $\text{SO}_2$  ( $\mu\text{g.m}^{-3}$ ) estimada pelo AERMOD.

Nos dois casos os valores estimados são relativamente baixos, sendo os máximos anuais inferiores a  $11 \mu\text{g.m}^{-3}$ , no caso do ISCST3, e inferiores a  $5 \mu\text{g.m}^{-3}$ , no caso do AERMOD. Comparativamente ao AERMOD, o ISCST3 sobrestima as concentrações a Nordeste do domínio; os valores mais altos estimados pelo ISCST3, superiores a  $5 \mu\text{g.m}^{-3}$ , verificam-se em receptores a altitudes superiores a 320 m.

No capítulo 6 os resultados dos dois modelos são avaliados por comparação com os dados das estações da RMQA, tendo em conta a metodologia aplicável a séries temporais longas descrita em 3.4 (nomeadamente, aplicação de gráficos de quantil-quantil e teste de RHC).



## 6 AVALIAÇÃO DOS MODELOS

Os resultados da aplicação do AERMOD e do ISCST3 foram avaliados, em termos de concentrações médias horárias, recorrendo a uma análise gráfica do tipo quantil-quantil (Q-Q). A Figura 46 relaciona a série de concentrações de SO<sub>2</sub> medidas no conjunto das estações da RMQA, ordenadas por ordem decrescente, com as séries estimadas pelos dois modelos nos receptores correspondentes às mesmas estações, ordenadas de forma idêntica. No que diz respeito ao AERMOD, estão representadas a série “C12-Final”, que procurou o melhor ajuste aos valores máximos da RMQA, e a série designada por “Pego”, que se baseou nas características do terreno para a definição dos parâmetros relacionados com as características da superfície (rugosidade, razão de Bowen e albedo).

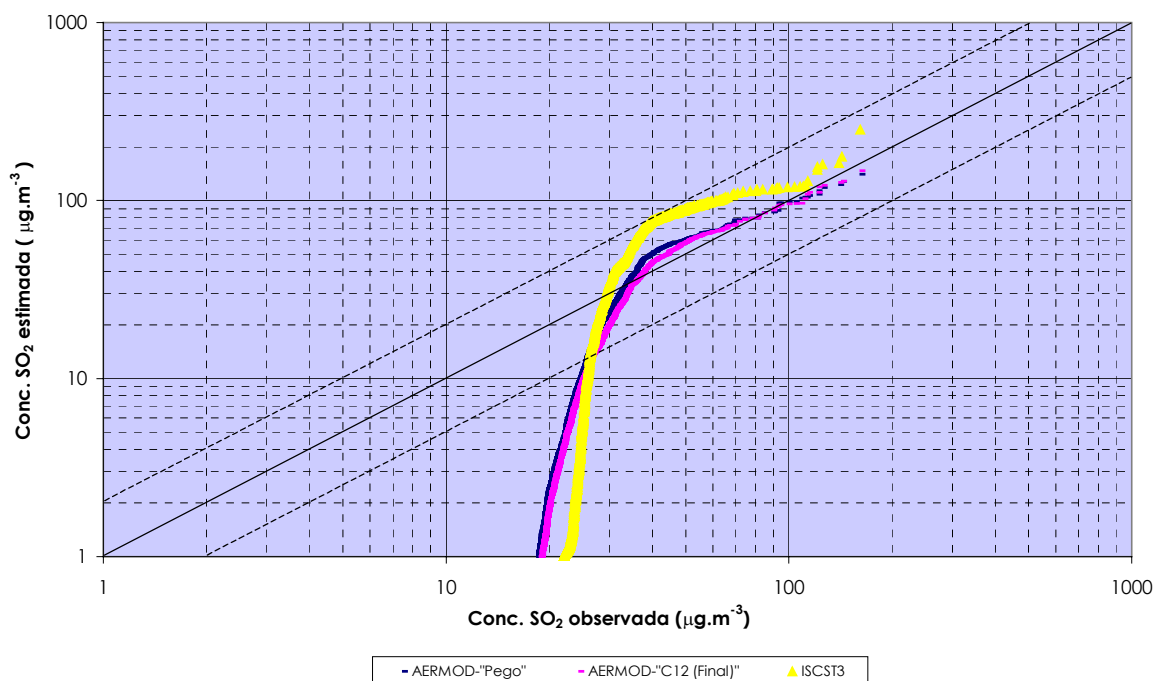


Figura 46 – Gráfico Q-Q das concentrações de SO<sub>2</sub> (µg.m<sup>-3</sup>) estimadas pelos modelos ISCST3 e AERMOD e observadas na RMQA

A figura mostra existir uma boa concordância dos valores estimados pelo AERMOD para concentrações acima de 40 µg.m<sup>-3</sup>, embora se note uma ligeira tendência para subestimar as concentrações acima de 100 µg.m<sup>-3</sup>. O comportamento das duas séries AERMOD é idêntico. A curva do ISCST3 aproxima-se, também, da série de observações, embora seja clara a tendência do ISCST3 para sobrestimar as concentrações acima de cerca de 40 µg.m<sup>-3</sup>, embora não além de um factor 2 (representado, no gráfico, pelas linhas indicadas a tracejado, paralelas à linha 1:1).

Foi também calculada a concentração mais alta robusta (RHC) – descrita em 3.4 – para as mesmas séries horárias de observações e estimativas dos modelos, considerando apenas o máximo dos valores observados/estimados em cada hora nos seis pontos de monitorização.

A razão entre a RHC da série estimada e a RHC da série de valores medidos é de 0,87 e 0,90 para as séries “Pego” e C12, no caso do AERMOD, e de 1,18, no caso do ISCST3. Verifica-se assim, uma vez mais, uma tendência do AERMOD para subestimar os valores horários, e a tendência contrária do ISCST3.

Quando se comparam as séries de médias diárias e anuais, verifica-se que os valores estimados são muito inferiores aos medidos, com excepção do Pego. No Quadro 19 transcreve-se a informação já apresentada anteriormente no Quadro 15.

Quadro 19 – Concentrações de SO<sub>2</sub> (µg.m<sup>-3</sup>) estimadas pelo AERMOD e ISCST3 e medidas na RMQA

Série de dados	Abrantes			Pego			Mouriscas			Mação			Gavião			S. Facundo		
	Max. 1 h	Max. 24 h	Ano	Max. 1 h	Max. 24 h	Ano	Max. 1 h	Max. 24 h	Ano	Max. 1 h	Max. 24 h	Ano	Max. 1 h	Max. 24 h	Ano	Max. 1 h	Max. 24 h	Ano
AERMOD “C12 Final”	146,7	8,9	0,8	129,6	24,9	2,8	126,2	9,1	1,0	88,4	6,0	0,8	94,6	6,1	0,9	85,1	5,9	0,2
AERMOD “Pego”	127,8	8,2	1,0	140,2	25,3	3,4	118,1	9,3	1,0	86,3	6,4	0,8	55,1	6,5	1,1	103,0	5,7	0,3
ISCST3	122,2	14,3	0,6	249,7	21,4	1,2	176,3	15,9	0,6	71,3	10,0	1,2	109,7	34,7	3,6	93,8	3,9	0,1
RMQA	142,8	45,0	13,8	113,5	22,7	8,6	121,2	33,9	14,2	161,4	28,1	8,6	92,5	25,8	9,0	89,8	26,0	12,8

O Quadro 20 mostra os resultados obtidos por adição aos valores estimados, hora a hora, de um valor de correcção, da mesma ordem de grandeza do valor de base dos registos semi-horários das respectivas estações da RMQA. Este procedimento foi usado em 5 das 6 estações da RMQA. Na estação de Mouriscas as flutuações dos valores ao longo dos dias são muito marcadas, o que dificulta este tipo de análise; por esta razão, não foi possível efectuar esta correcção.

Quadro 20 – Comparação dos parâmetros estatísticos da série de observações e das séries simuladas pelo AERMOD (simulação C12) e pelo ISCST3 com e sem correcção

Concentrações de SO <sub>2</sub> (µg.m <sup>-3</sup> )	Estação RMQA	AERMOD sem correcção	AERMOD com correcção	ISCST3 sem correcção	ISCST3 com correcção
Abrantes					
Valor Mínimo	1,5	0,0	10,0	0,0	10,0
Percentil 1	7,6	0,0	10,0	0,0	10,0
Percentil 10	8,9	0,0	10,0	0,0	10,0
Percentil 50	11,9	0,0	10,0	0,0	10,0
<b>Média anual</b>	<b>13,8</b>	<b>0,8</b>	<b>11,1</b>	<b>0,6</b>	<b>10,8</b>
Percentil 95	25,6	3,0	16,0	0,0	16,0
Percentil 98	34,5	12,4	23,8	2,9	16,0
Percentil 99,9	87,9	65,8	76,4	82,3	93,4
Valor Máximo	142,8	146,7	156,7	122,2	132,2
Pego					
Valor Mínimo	0,0	0,0	6,4	0,0	6,4
Percentil 1	5,7	0,0	6,4	0,0	6,4
Percentil 10	6,4	0,0	6,4	0,0	6,4
Percentil 50	7,6	0,0	6,4	0,0	6,4
<b>Média anual</b>	<b>8,6</b>	<b>2,8</b>	<b>9,3</b>	<b>1,2</b>	<b>7,6</b>
Percentil 95	12,9	21,5	29,5	0,0	6,4
Percentil 98	20,7	48,3	55,4	12,0	19,7
Percentil 99,9	72,3	72,5	79,2	115,6	122,0
Valor Máximo	113,5	129,6	136,0	249,7	256,1
Mação					
Valor Mínimo	1,3	0,0	3,2	0,0	3,2
Percentil 1	2,6	0,0	3,2	0,0	3,2
Percentil 10	3,2	0,0	3,2	0,0	3,2
Percentil 50	6,3	0,0	3,2	0,0	3,2
<b>Média anual</b>	<b>8,6</b>	<b>0,8</b>	<b>4,3</b>	<b>1,2</b>	<b>4,7</b>
Percentil 95	20,6	3,7	12,0	2,1	12,0
Percentil 98	27,6	10,5	15,2	22,9	27,2
Percentil 99,9	49,7	37,1	41,9	59,7	63,2
Valor Máximo	161,4	88,4	91,6	71,3	74,5
Gavião					
Valor Mínimo	3,2	0,0	4,8	0,0	4,8
Percentil 1	3,8	0,0	4,8	0,0	4,8
Percentil 10	4,8	0,0	4,8	0,0	4,8
Percentil 50	6,8	0,0	4,8	0,0	4,8
<b>Média anual</b>	<b>9,0</b>	<b>0,9</b>	<b>7,6</b>	<b>3,5</b>	<b>10,2</b>
Percentil 95	18,3	5,4	14,3	30,1	40,2
Percentil 98	22,2	11,7	18,0	76,1	83,2
Percentil 99,9	59,3	40,4	47,3	97,8	104,4
Valor Máximo	92,5	94,6	99,4	109,7	123,7
S. Facundo					
Valor Mínimo	0,5	0,0	4,0	0,0	4,0
Percentil 1	3,7	0,0	4,0	0,0	4,0
Percentil 10	6,0	0,0	4,0	0,0	4,0
Percentil 50	12,3	0,0	9,1	0,0	9,0
<b>Média anual</b>	<b>12,8</b>	<b>0,2</b>	<b>10,9</b>	<b>0,1</b>	<b>10,8</b>
Percentil 95	21,0	0,5	17,0	0,0	17,0
Percentil 98	25,0	1,6	17,1	0,0	17,0
Percentil 99,9	56,3	39,9	55,6	18,2	29,6
Valor Máximo	89,8	85,1	94,1	93,8	104,6

Os registos da estação do Pego mostram um nível de base relativamente constante, ao longo do ano, entre 6 e 8  $\mu\text{g.m}^{-3}$ . Somando aos valores estimados pelo AERMOD e pelo ISCST3, hora a hora, um valor de correcção de 6,4 (valor correspondente ao percentil 10 dos valores medidos nesta estação - Figura 31), obtém-se uma concordância satisfatória entre as séries estimadas e medida. A distribuição estatística da série AERMOD corrigida é comparável à da estação de monitorização, em termos de média anual, percentil 99,9 e máximo, embora com percentis 95 e 98 da ordem do dobro, reflectindo alguma tendência do modelo para sobrestimar as concentrações máximas no Pego. No caso do ISCST3 os percentis 95 e 98 estão relativamente próximos, mas o percentil 99,9 e o máximo são bastante superiores.

Nas outras estações é necessário corrigir os valores horários usando diferentes valores de correcção ao longo do ano, dependendo do número de “patamares” relevantes encontrados nos respectivos registos. No caso de Abrantes e de Mação, foram adicionados valores de, respectivamente, 10  $\mu\text{g.m}^{-3}$  e 3,2  $\mu\text{g.m}^{-3}$ , durante quase todo o ano, à excepção de uma parte do mês de Dezembro, em que os valores de base dos registos subiram para cerca de 16  $\mu\text{g.m}^{-3}$  e 12  $\mu\text{g.m}^{-3}$ , respectivamente. Na estação do Gavião distinguiram-se 3 patamares (14, 4,8 e 7  $\mu\text{g.m}^{-3}$ ) e na estação de S. Facundo 4 patamares (17, 14, 4 e 9  $\mu\text{g.m}^{-3}$ ), com duração correspondente aos patamares observados nos respectivos registos semi-horários, apresentados anteriormente.

Conclui-se da análise anterior que a distribuição estatística dos valores estimados pelo AERMOD ou pelo ISCST3, para cada estação analisada, se aproxima satisfatoriamente dos valores medidos, por aplicação, aos valores estimados por ambos os modelos, de um valor de correcção horário da mesma ordem de grandeza do valor de base dos registos semi-horários das respectivas estações.



## 7 CONCLUSÕES

O estudo apresentado permitiu comparar as potencialidades e as limitações da aplicação dos modelos ISCST3 e AERMOD à Central Termoelétrica do Pego, nas condições de simulação consideradas no caso de estudo. O trabalho demonstrou que ambos os modelos são capazes de simular, de forma satisfatória, o impacto na qualidade do ar local das emissões de dióxido de enxofre da Central, embora o grau de desempenho demonstrado tenha sido diferente.

A avaliação dos modelos foi feita por comparação com as séries anuais obtidas nas seis estações da RMQA. Relativamente aos valores médios horários, para concentrações acima de  $40 \mu\text{g.m}^{-3}$  verificou-se existir uma boa concordância dos valores estimados pelo AERMOD com os valores medidos e uma clara tendência do ISCST3 para sobrestimar as concentrações, embora não mais do que um factor 2. Apesar do desempenho do AERMOD ter sido globalmente satisfatório, notou-se uma ligeira tendência do modelo para subestimar os valores máximos horários.

No que diz respeito às médias diárias e anuais, a incerteza associada aos valores medidos na RMQA afecta substancialmente a sua comparação com os valores estimados, que são, em geral, bastante inferiores, à excepção do Pego. Estas discrepâncias são justificadas pelo facto de os valores mínimos medidos estarem afectados por erros de medição com origem em desvios do zero dos analisadores de  $\text{SO}_2$ , e também, possivelmente, por concentrações de fundo. A magnitude dos desvios é variável ao longo do ano e com a estação; nestas condições, a incerteza associada aos valores medidos não permite retirar conclusões claras quanto ao desempenho dos modelos em termos de médias anuais e diárias. Os valores de pico de médias de curta duração são pouco afectados por estes factores, porque a incerteza é uma pequena parte percentual do valor reportado.

Na área de simulação, as concentrações mais altas obtidas pelos dois modelos, superiores ao valor limite horário de  $350 \mu\text{g.m}^{-3}$ , situam-se a nordeste e a norte da Central, numa zona do domínio que apresenta relevo mais acentuado. Nestas condições de terreno complexo, os resultados do ISCST3 devem ser tomados com bastantes reservas, uma vez que o modelo fornece estimativas conservadoras. O AERMOD estima valores superiores ao valor limite horário de  $350 \mu\text{g.m}^{-3}$  a cerca de 15 km a Norte-Nordeste da Central, na zona da Serra da Amêndoa; contudo, o número de violações é inferior ao valor máximo estabelecido no Decreto-Lei nº111/2002.

Os valores máximos estimados pelo AERMOD e a maioria dos estimados pelo ISCST3 ocorrem em condições de forte estabilidade atmosférica, frequentes na região durante a noite.

Os resultados obtidos próximo dos limites do domínio de simulação sugerem que possam ocorrer ultrapassagens ao valor-limite horário fora da área simulada, a distâncias da ordem de 20 km a Nordeste e Norte da Central. A estas distâncias, contudo, a utilização de modelos Gaussianos é já desaconselhada, uma vez que o pressuposto de estado estacionário não é aceitável. A aplicação

de um modelo de transporte de maior distância, de estado não estacionário, permitiria avaliar a influência da Central do Pego numa escala espacial mais alargada, principalmente o efeito da orografia a Norte e Nordeste, na zona da Serra da Amêndoa e da Serra de Santo António.

As diferenças observadas entre as várias rosas de ventos obtidas para as estações de qualidade do ar e para a Central, evidenciam o facto de o campo de ventos na região não ser homogéneo em toda a área simulada – o que contraria outro pressuposto importante da aplicação dos modelos Gaussianos; as diferenças são mais notórias para as estações mais distantes (Mação, Gavião e S. Facundo), onde a representatividade dos dados meteorológicos da Central é questionável.

O estudo comparativo feito tem, assim, limitações inerentes, devido principalmente às incertezas associadas às observações da RMQA e aos dados meteorológicos. Relativamente aos últimos, salienta-se o facto de as potencialidades do AERMOD não terem sido aproveitadas como seria desejável, com dados medidos a diferentes níveis, incluindo alturas próximas do penacho. De facto, trata-se de uma chaminé muito alta e de um penacho com força ascensional elevada. A incerteza associada à direcção do vento é agravada pela diferença de altitudes do cata-vento e do penacho. A ausência de medidas de nebulosidade no local é outra fonte adicional de incerteza.

As conclusões retiradas estão baseadas num ano de dados horários, 2003 – que foi, do ponto de vista meteorológico, um ano excepcionalmente quente. A aplicação a diferentes séries anuais permitiria generalizar a análise do comportamento dos modelos a outras condições de meteorologia, bem como de emissão. O efeito da sazonalidade, bastante marcada no que diz respeito ao regime de ventos, e o efeito da estabilidade atmosférica na resposta dos modelos são outros factores que, por limitação de tempo, não foi possível analisar com mais detalhe.

Um aspecto importante a reter da aplicação do AERMOD diz respeito à influência, nos resultados do modelo, dos parâmetros dependentes do tipo de cobertura do solo - a rugosidade, a razão de Bowen e o albedo. Da análise de sensibilidade feita com o AERMOD, conclui-se que os valores simulados variam consideravelmente com as variações experimentadas, principalmente com a rugosidade, e que a resposta do modelo não é linear; por outro lado, o modelo comportou-se de forma diferente nos vários pontos de monitorização. A definição destes parâmetros é, assim, um aspecto muito importante da aplicação do AERMOD, que requer uma abordagem cuidadosa e dispendiosa em tempo, por parte do utilizador. A definição dos valores a atribuir, no espaço e no tempo, com base na análise de fotografias aéreas e cartas militares, é um processo moroso e pouco expedito, além de ser uma fonte acrescida de erro, dependendo da qualidade e da actualidade da informação usada. Esta definição pode ser facilitada, se existir uma classificação do uso do solo para a área de simulação, a uma escala adequada e, ainda, um método expedito de leitura dessa informação e cálculo dos valores de cada parâmetro, ponderados em função da área ocupada por tipo de cobertura do solo, sector e estação do ano. Outro aspecto que ressaltou da análise feita foi o facto de as categorias de usos de solo pré-definidas pelo AERMET serem demasiado genéricas e limitadas em tipos, sendo difícil enquadrar alguns dos usos encontrados

na região do Pego. Em termos de variação sazonal, os valores recomendados também não estão adaptados às condições climáticas locais.

A aplicação do modelo AERMOD a Portugal apresenta outras limitações, nomeadamente no que diz respeito à informação meteorológica. O pré-processamento de dados meteorológicos para o AERMOD é executado pelo programa AERMET, cuja aplicação é restringida às regiões do globo em que a sondagem das 12h00 TU corresponde ao início da manhã. Para ultrapassar este problema, é possível recorrer a versões comerciais do AERMOD, que incluem pré-processadores modificados com módulos de cálculo adaptados, aplicáveis na Europa, com recurso apenas a observações de rotina de variáveis meteorológicas. A necessidade de recorrer a um processador meteorológico externo ao sistema AERMOD da U.S. EPA, insuficientemente documentado na bibliografia, é um factor importante de incerteza a ter em conta na análise do desempenho global do modelo. O recurso a modelos numéricos de previsão de tempo, como fonte de dados meteorológicos de base ao AERMOD, é uma outra possibilidade a considerar, que requer um trabalho de pesquisa adicional, no sentido de identificar: as potenciais fontes de dados, a eventual necessidade de pós-processamento da informação fornecida pelo modelo de previsão para o cálculo das variáveis requeridas pelo AERMOD e a compatibilização de formatos, custos de obtenção da informação, etc..

## 7. CONCLUSÕES

## 8 REFERÊNCIAS

AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY (1978) *Technical Notes of the Committee on Atmospheric Turbulence and Diffusion*; Bulletin American Meteorological Society, vol.59, n.º8, 1025.

ASTM (2000) *Standard Guide for Statistical Evaluation of Atmospheric Dispersion Model Performance*, D 6589; American Society for Testing and Materials (<http://www.astm.org>).

ATKINSON, D; LEE, R.F. (1992) *Procedures for Substituting Values for Missing NWS Meteorological Data for Use in Regulatory Air Quality Models* (<http://www.epa.gov/scram001/tt24.htm#guidance>).

BORREGO, C.; THOMAZ, S.; MIRANDA, A.I. (1995) *Sulphur Dioxide Dispersion from a Main Point Source in Portugal: Comparison between Models*; International Journal of Environment and Pollution, Vol. 5; 567-574.

BORREGO, C.; LEMOS, S.; GUERREIRO, C; MARTINS, J.M. (1996) *A second Generation Gaussian Dispersion Model: the Polaris Model™*; Proc. 4<sup>th</sup> Workshop on Harmonization within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes; 493-500; Bélgica.

BORREGO, C.; TCHEPEL, O.; BARROS, N.; MIRANDA, A.I. (2000a) *Impact of Road Traffic Emissions on Air Quality of the Lisbon Region*; Atmospheric Environment, 34, 4683-4690.

BORREGO, C.; TCHEPEL, O.; CARVALHO, A.C. (2000b) *Model Quality Assurance*; Proc. EUROTRAC-2 Symposium 2000; Springer-Verlag, Berlin.

BORREGO, C.; MIRANDA, A.I.; COUTINHO, M.; COSTA, A.M.; GOMES, P., RIBEIRO, C. (2001) *The Impact of Road Traffic on the Urban Air Quality: a Modelling and an Experimental Approach*; Proc. 7<sup>th</sup> International Conference on Environmental Science and Technology; University of Aegean, Global Nest, T.D. Lekkas, Vol. A; 90-97.

BORREGO, C.; TCHEPEL, O.; MONTEIRO, A.; MIRANDA, A.I.; BARROS, N. (2002) *Influence of Traffic Emissions Estimation Variability on Urban Air Quality Modelling*; Water, Air and Soil Pollution: Focus 2; 487-499.

BORREGO, C.; TCHEPEL, O.; COSTA, A.M.; AMORIM, J.H.; MIRANDA, A.I. (2003a) *Emission and Dispersion Modelling of Lisbon Air Quality at Local Scale*; Atmospheric Environment 37, 5197-5205.

BORREGO, C.; SCHATZMANN, M.; GALMARINI, S. (2003b) *Quality Assurance of Air Pollution Models*; SATURN Final Report – Air Quality in Cities, Chapter 7; Moussiopoulos N., ed., Springer, Heidelberg, 299.

- CARRUTHERS, D.J.; HOLROYD, R.J.; HUNT, J.C.R.; WENG, W.S.; ROBINS, A.G.; APSLEY, D.D.; THOMPSON, D.J.; SMITH, F.B. (1994) *UK-ADMS: A new approach to modelling dispersion in the earth's atmospheric boundary layer*, Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 52, 139-153.
- CIMORELLI, A.J.; PERRY, S.G.; VENKATRAM, A.; WEIL, J.C.; PAINE, R.J.; WILSON, R.B.; LEE, R.F.; PETERS, W.D.; BRODE, R.W.; PAUMIER, J.O. (2004) *AERMOD: Description of Model Formulation*; EPA-454/R-03-004; U.S. Environmental Protection Agency; USA; 91 pp. ([http://www.epa.gov/scram001/7thconf/aermod/aermod\\_mfd.pdf](http://www.epa.gov/scram001/7thconf/aermod/aermod_mfd.pdf)).
- ECKHOFF, P. (2003) *Revised Draft User's Guide for the AERMOD Terrain Preprocessor (AERMAP)*; Emissions, Monitoring, and Analysis Division, Office of Air Quality Planning and Standards, U.S. Environmental Protection Agency; USA; 99 pp. (<http://www.epa.gov/scram001/7thconf/aermod/aermapugb2.pdf>).
- ELECTRICIDADE DE PORTUGAL (1988) *Central Termoeléctrica do Pego - Caracterização Meteorológica da Região*; Ref. 100.NT.88T0770 (doc. interno).
- GOLDER, D. (1972) *Relations among stability parameters in the surface layer*, Boundary Layer Meteorol., 3, 47-58.
- GRIFONI, R.C.; BISEGNA, F.; PASSERINI, G. (2002) *A Refinement of AERMOD Results by means of Mesoscale Model Simulation*; 8<sup>th</sup> International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, HARMO8, The National Institute of Meteorology and Hydrology, Bulgarian Academy of Sciences, 14-17 Outubro, Sofia, Bulgária.
- HALL, D.J.; SPANTON, A.M.; DUNKERLEY, F.N.; BENNETT, M.; GRIFFITHS, R.F. (2000a) *A Review of Dispersion Model Intercomparisons Studies using ISC, R91, AERMOD e ADMS*; R&D Technical Report P353; UK Environment Agency.
- HALL, D.J.; SPANTON, A.M.; BENNETT, M.; DUNKERLEY, F.N.; GRIFFITHS, R.F.; FISHER, B.E.A.; TIMMIS, R.J. (2000b) *An Intercomparison of the AERMOD, ADMS and ISC Dispersion Models for Regulatory Applications*; R&D Technical Report P362; UK Environment Agency.
- HALL, D.J.; SPANTON, A.M.; BENNETT, M.; DUNKERLEY, F.N.; GRIFFITHS, R.F.; FISHER, B.E.A.; TIMMIS, R.J. (2001) *An Intercomparison of the AERMOD, ADMS and ISC Dispersion Models for Regulatory Applications*; 7<sup>th</sup> International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, HARMO7, JRC-EI, 28-31 Maio, Belgirate, Itália (<http://rtmod.jrc.it/~thunis/harmo7/P47.pdf>).
- HALL, D.J.; SPANTON, A.M.; BENNETT, M.; DUNKERLEY, F.N.; GRIFFITHS, R.F.; FISHER, B.E.A.; TIMMIS, R.J. (2002) *Evaluation of new generation atmospheric dispersion models*; Int. J. of Environment and Pollution, Vol. 18, No.1; 22-32.

HANNA, S.R.; EGAN, B.A.; PURDUM, J.; WAGLER, J. (2001) *Evaluation of the ADMS, AERMOD, and ISC3 dispersion models with the OPTEX, Duke Forest, Kincaid, Indianapolis and Lovett field datasets*; Int. J. of Environment and Pollution, Vol. 16, No.1/2/3/4/5/6; 301-314.

LEONG, K.U.; MIRANDA, A.I.; BORREGO, C. (2000) *The multi-puff approach and the optimum interpolation technique to improve a classical Gaussian model*; International Conference on Air Pollution, VIII, Cambridge, 2000 – Air Pollution VIII; WIT Press, Southampton, Boston; J. Longhurst, C. Brebbia and H. Power; 99-108.

MIRANDA, A.I.; CONCEIÇÃO, M.; BORREGO, C. (1993) *A Contribution to the Air Quality Impact Assessment of a Roadway in Lisbon. The Air Quality Model Apolo*; The Science of the Total Environment, Vol. 134; 1-7.

NIXON, S.C.; REES, Y.J.; GUNBY, J.A.; MOUSSIOPOULOS, N.; BERGE, E.; TROND B., DE LEEUW, F.; KNUT, E., MYLONA, S.; TOMBROU, M. (1999) *Ambient air quality, pollutant dispersion and transport models, Topic report No 19/1996*; European Environment Agency.

OLESEN, H.R. (2001) *A Platform for Model Evaluation*; 7<sup>th</sup> International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, HARMO7; Belgirate, Itália.

OMSTEDT, G. (2001) *Estimation of Boundary Layer Parameters for Dispersion Calculations using Outputs from Numerical Weather Prediction Models*; 7<sup>th</sup> International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, HARMO7; Belgirate, Itália.

PAINE, R.J.; Lee, R.F.; Brode, R.; Wilson, R.B.; Cimorelli, A.J.; Perry, S.G.; Weil, J. C.; Venkatram, A.; Peters, W.D. (1998) *Model Evaluation Results for AERMOD, draft document*; U.S. Environmental Protection Agency (<http://www.epa.gov/scram001/7thconf/aermod/evalrep.pdf>).

PAUMIER, J.O.; BRODE, R.W. (1999) *Revised Draft User's Guide for the AERMOD Meteorological Preprocessor (AERMET)*; Office of Air Quality Planning and Standards, U.S. Environmental Protection Agency; USA; 273 pp. (<http://www.epa.gov/scram001/7thconf/aermod/aermetug.pdf>).

SAX, T.; ISAKOV, V. (2003) *A case study for assessing uncertainty in local-scale regulatory air quality modeling applications*; Atmospheric Environment 37, 3481-3489.

SCHNELLE, K.B.; DEY, P.R. (2000) *Atmospheric Dispersion Modeling Compliance Guide*; McGraw-Hill, New York.

SEINFELD, J.H.; PANDIS, S.N. (1998) *Atmospheric Chemistry and Physics, From Air Pollution to Climate Change*; Wiley Interscience, New York; 1326pp; ISBN 0-471-17815-2; USA.

SCHULMAN, L.L.; STRIMAITIS, D.G.; SCIRE, J.S. (2000) *Development and Evaluation of the PRIME Plume Rise and Downwash Model*; J. Air & Waste Management Assoc., 50; 378-390.

- SCHULZE, R.H. (2001) *Procedures used by the United States Environmental Protection Agency (US-EPA) to develop and adopt newer dispersion models*; International Journal of Environment and Pollution 2001 - Vol. 16, No.1/2/3/4/5/6; 483-494.
- SPANTON, A.M.; HALL, D.J.; DUNKERLEY, F.; GRIFFITHS, R.F.; BENNETT, M. (2005) *A dispersion model intercomparison archive*; Int. J. of Environment and Pollution, Vol. 24, No.1/2/3/4; 4-10
- TEJO ENERGIA – PRODUÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉCTRICA, S.A.; Pegop (2003) *Sumário Segurança Ambiente 2003* ([http://www.pegop.com/relatorios/Sumario\\_2003.pdf](http://www.pegop.com/relatorios/Sumario_2003.pdf)).
- TRINITY CONSULTANTS (1994) *A Technique to Estimate Mixing Depths from Surface Observations*; Trinity Consultants Incorporated.
- TRINITY CONSULTANTS (2000) *BREEZE SUITE Version 3.3 Addendum*; Trinity Consultants Incorporated.
- TRINITY CONSULTANTS (1991) *BREEZE ® ISC and AERMOD SUITE Version 3.2 User's Guide*; Trinity Consultants Incorporated.
- U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (1985) *Guidance for Determination of Good Engineering Practice Stack Height (Technical Support Document for the Stack Height Regulations) (Revised)*; EPA Report 450/4-80-023R; Office of Air Quality Planning and Standards, U.S. Environmental Protection Agency; USA; 102 pp. (<http://www.epa.gov/scram001/guidance/guide/gep.pdf>).
- U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (1995a) *User's Guide for the Industrial Source Complex (ISC3) Dispersion Models, Volume II – Description of Model Algorithms*; EPA Report EPA-454/B-95-003b; Office of Air Quality Planning and Standards, Emissions, Monitoring, and Analysis Division, U.S. Environmental Protection Agency; USA; 128 pp. (<http://www.epa.gov/scram001/userg/regmod/isc3v2.pdf>).
- U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (1995b) *User's Guide for the Industrial Source Complex (ISC3) Dispersion Models, Volume I – User Instructions*; EPA Report 454/B-95-003a; Office of Air Quality Planning and Standards, Emissions, Monitoring, and Analysis Division, U.S. Environmental Protection Agency; USA; 390 pp. (<http://www.epa.gov/scram001/userg/regmod/isc3v1.pdf>).
- U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (1999) *PCRAMMET User's Guide*; EPA Report EPA-454/B-96-001; Office of Air Quality Planning and Standards, Emissions, Monitoring, and Analysis Division, U.S. Environmental Protection Agency; USA; 95 pp. (<http://www.epa.gov/scram001/userg/relat/pcramtd.pdf>).



U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (2000) *Meteorological Monitoring Guidance for Regulatory Modeling Applications*; EPA Report 454/R-99-005; Office of Air and Radiation, Office of Air Quality Planning and Standards, U.S. Environmental Protection Agency; USA; 168 pp. (<http://www.epa.gov/scram001/tt24.htm#guidance>).

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (2002a) *Addendum to User's Guide for the AERMOD Meteorological Preprocessor (AERMET)*; EPA 454/R-02-002b; Office of Air Quality Planning and Standards, U.S. Environmental Protection Agency; USA; 273 pp. (<http://www.epa.gov/scram001/tt26.htm>).

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (2002b) *Revised Draft User's Guide for the AMS/EPA Regulatory Model - AERMOD*; Office of Air Quality Planning and Standards, Emissions, Monitoring, and Analysis Division, U.S. Environmental Protection Agency; USA; 228 pp. (<http://www.epa.gov/scram001/7thconf/aermod/aermodugb.pdf>).

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (2003a) *AERMOD: Latest Features and Evaluation Results*; EPA Report 454/R-03-003; Office of Air Quality Planning and Standards, U.S. Environmental Protection Agency; 41 pp. ([http://www.epa.gov/scram001/7thconf/aermod/aermod\\_mep.pdf](http://www.epa.gov/scram001/7thconf/aermod/aermod_mep.pdf)).

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (2003b) *Availability of Additional Documents Relevant to Anticipated Revisions to Guideline on Air Quality Models. Addressing a Preferred General Purpose (Flat and Complex Terrain) Dispersion Model and other Revisions*; Federal Register Notice [FRL-7554-81, Vol. 68, No. 173, 8 Setembro 2003] (<http://www.epa.gov/scram001/7thconf/aermod/fedregnot.pdf>).

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (2003c) *Guideline on Air Quality Models*; 40 Code of Federal Regulations Part 51, Appendix W ([http://www.epa.gov/scram001/guidance/guide/appw\\_03.pdf](http://www.epa.gov/scram001/guidance/guide/appw_03.pdf)).

### Endereços na Internet

URL 1: <http://www.epa.gov/scram001/tt26.htm#aermod>

URL 2: <http://www.harmo.org/>

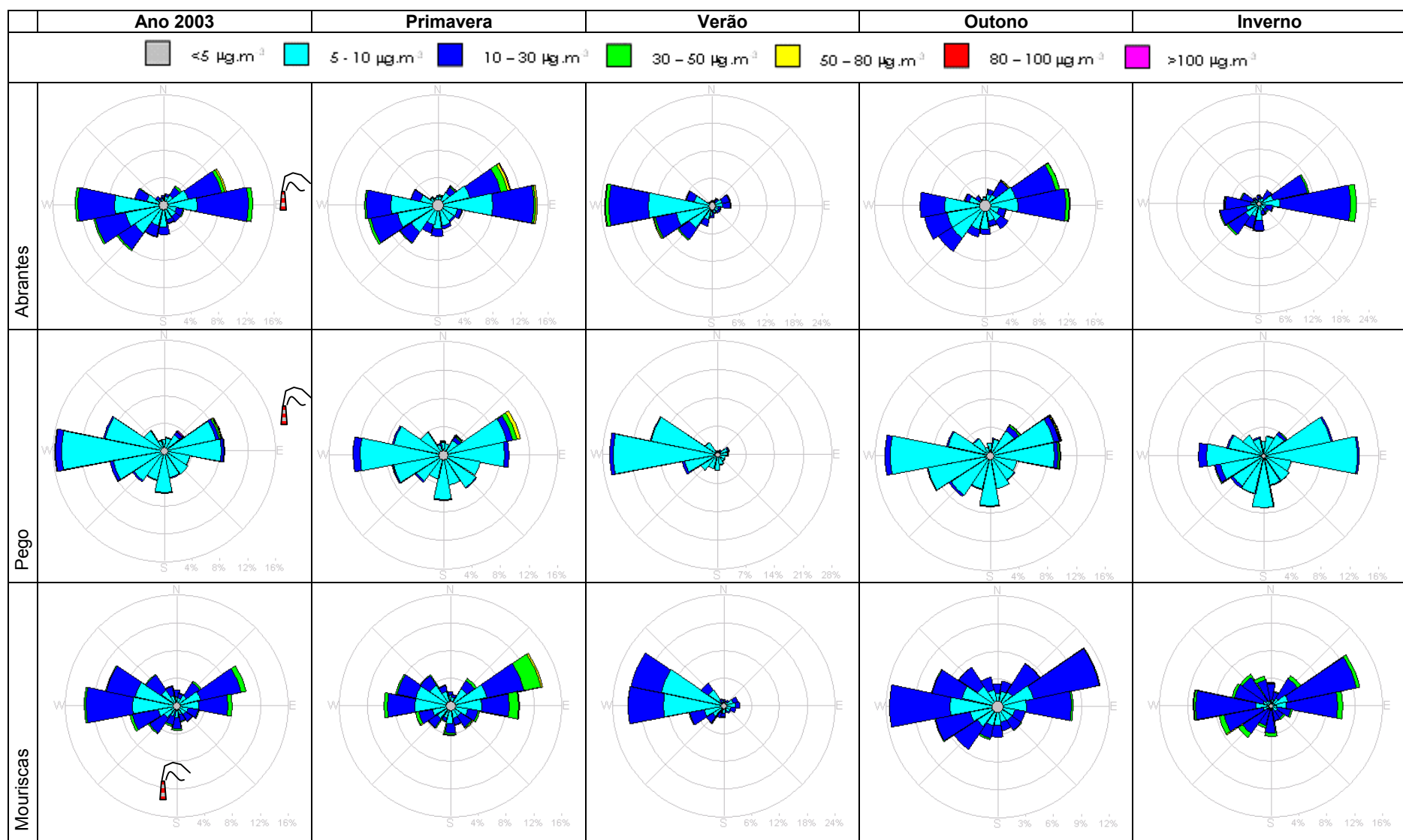
URL 3: [http://www.pegop.com/relatorios/Sumario\\_2003.pdf](http://www.pegop.com/relatorios/Sumario_2003.pdf)

URL 4: <http://ortos.igeo.pt/ortofotos/>

## 8. REFERÊNCIAS

## **ANEXO A – ROSAS DE POLUIÇÃO**





(Cont.)

